

航機離到場及地面操作國際趨勢初探

Preliminary Analysis of Aircraft Departure, Arrival and Ground Operation

運輸工程組 符玉梅 研究員

研究期間：民國107年1月至107年12月

摘要

全球航空公司 2017 年定期航班載運旅客數超過 40 億人次，國際航空運輸協會(International Air Transport Association, IATA)預測全球航空運量及旅客將持續成長，在強調環境友善之今日，航空運輸帶來的噪音、空氣污染等問題引發相當關注，鑑於機場容量設施擴增不易情況，航空業近年來致力於透過相關管理工具或調整作業模式等方式，提升機場運作效率及減少對環境之衝擊。

提升航機於機場空側作業效率為目前努力的方向之一，主要包括航機之離到場及地面操作階段，相關技術及解決方案正研發中，有些已付諸實施，為航空永續發展考量，機場利益關係人(如機場管理者、飛航服務提供者、航空公司、地勤業者等)之作業模式，未來可能有所變更或須配合調整。在航機離到場操作部分，目前主要採階段式爬升或下降模式，此種作業方式會增加航機作業時間、燃油消耗及噪音汙染，而性能導航等飛航技術程序之運用已漸為趨勢；在航機地面操作部分，目前係藉助地勤拖車後推，再使用航機自身發動機提供動力滑行，此作業方式增加燃油消耗、不具時間效率，相關之電動滑行系統技術亦刻正研發中。於航機離到場及地面操作階段如能有效運用相關技術，未來將有助提升運作效率、減少對環境之衝擊。

為掌握國際上相關發展及趨勢，本研究在蒐集國際上新運用或推動中之性能導航與相關運用技術，以及航機地面操作之電動滑行系統技術，研提建議供相關單位/公司未來制訂政策、增修法規或相關作業規定之參考。

關鍵詞：

性能導航、電動滑行系統

航機離到場及地面操作國際趨勢初探

一、前言

1.1 研究背景及目的

國際航空運輸協會(International Air Transport Association, IATA)預測全球航空運量及旅客將持續成長，全球航空公司定期航班載運旅客數，從 2004 年約 20 億人增加至 2017 年超過 40 億人次，預估 2018 年將進一步增為 43 億人次，換言之，近 15 年來全球航空運量成長為 2 倍，多數國家積極擴增機場容量以為因應。然航空運輸帶來噪音、空氣污染等問題，依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)有關全球氣候變遷之報告(Climate Change 2007)，全球溫室氣體排放中交通運輸佔 13%，而航空運輸溫室氣體排放佔交通運輸之 13~15%，亦即航空運輸之溫室氣體排放佔全球約 2%^[1]。現今環保意識擡頭且強調環境友善，航空運輸對環境造成衝擊近年引發相當關注，多數機場面臨土地取得困難、基礎設施增加不易的困境，部分機場之擴增計畫或延宕或停擺，爰航空業近年來致力於在航機飛航各階段，透過相關管理工具或調整作業模式等方式，提升機場運作效率及減少對環境之衝擊。

提升航機於機場空側作業效率為航空業目前努力的方向之一，主要包括航機離到場及地面操作兩大部分，相關技術及解決方案或正研發中，或已付諸實施，為航空永續發展所需，機場管理者、飛航服務提供者、航空公司、地勤業者等利害關係人之作業模式可能須配合變更或調整。在航機離到場部分，目前主要採階段式爬升/下降操作，此作業方式增加飛行時間、燃油消耗及排放/噪音對環境之衝擊，如航情許可且相關條件配合，航機有機會使用持續爬升操作(Continuous Climb Operations, CCO)及持續下降操作(Continuous Descent Operations, CDO)技術；而性能導航等飛航技術之運用有助提升航機效率，亦可減少對環境之影響。至於航機地面操作部分，於停機坪後推時，目前係藉助人力駕駛拖車後推航機，於滑行道滑行時則使用航機自身發動機提供動力讓航機滑行，然據統計航機於地面滑行階段消耗之燃油，最高佔航機全部燃油消耗之 10%，且機坪上作業人員之安全亦有疑慮，故航機於機場空側地面操作之效率及所衍生之空氣污染等問題確有改善空間，相關電動滑行技術等替代方案刻正研發中，期減少此階段之燃油消耗，兼能減少對環境影響及提升場面安全。

為能掌握國際發展趨勢，應持續蒐集掌握國際上相關發展方向，本研究旨在蒐集國際上新運用或推動中之航機性能導航相關操作技術，以及航機地

面操作之電動滑行系統技術等進行探析，瞭解掌握國際發展現況及趨勢，供相關單位未來制訂政策、增修法規或相關作業規定、後續精進航機離到場及地面操作，甚或航空業規劃相關操作訓練之建議，最後將研提相關之結論與建議。

1.2 研究範圍

一般機場作業由空側及陸側兩大區塊組成，其中空側包括跑道、滑行道、停機坪、勤務道路、機場空域，陸側部分則包括航廈、候機廊廳、聯外道路、倉儲及其他房舍等，兩者以登機門為分界^[2]。依據民航局「航空站空側作業管理手冊」，機場空側作業範圍包括操作區、活動區及活動區外之空側管制區，其中操作區係指機場內供航空器起飛、降落及滑行之區域，但不包括停機坪，而活動區指機場內供航空器起飛、降落及及滑行之區域，包括操作區及停機坪^[3]，本研究有關航機離到場及地面操作之探討係以終端離到場及機場空側活動區為主要範圍。

二、文獻回顧

2.1 相關文獻

國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)於 2015 年舉行之全球航空對話會議(Global Aviation Dialogues, GLADs)指出，提升航管作業程序將有助改善氣體排放，例如離場持續爬升操作、到場持續下降操作、飛航空層最佳化等等^[4]。目前航機於機場起飛與降落之離到場程序係採階梯式爬升與階梯式下降，即以漸進方式，分階段爬升或下降至管制員指定之某個飛航高度，此操作模式增加航機作業時間、燃油消耗，噪音也較高。ICAO 針對航機離到場之操作推動相關精進作法或替代方案，其中第 9931 號文件係為航機到場持續下降操作(Continuous Descent Operations, CDOs)之指導手冊，讓航機在下降階段能避免或減少平飛次數，使航機能儘速降落在跑道上^[5]；第 9993 號文件則為航機離場持續爬升操作(Continuous Climb Operations, CCOs)之指導手冊，讓航機在爬升階段能避免或減少平飛次數，使航機能儘速抵達巡航高度^[6]。

Eurocontrol 認為航空器噪音及廢氣排放限制了機場發展，並增加作業成本，航機持續下降操作可幫助減少前述問題，持續下降操作為一種航機操作技術，到場航機以發動機最小推力從適當位置下降，在安全操作及符合相關程序與航管指示之前提下，儘可能減少平飛階段，此作業方式對歐洲航空系統內各利害關係人皆會有所助益^[7]。Paul Mark Alexander DE

JONG(2014)認為現行之航機起降程序，管制員係透過高度及速度指令，以維持於機場起飛及降落之航機安全隔離，這些指令僅是讓飛航管制員更易於維持航機隔離，但對個別航機可能非最合適，那些航管指令通常包含數個平飛階段，航機在平飛階段必須維持固定速度，須有足夠推力以維持高度及速度，持續下降操作目標即在減少平飛階段，為一種讓航機推力需求最小之下降程序^[8]。

英國民航局表示因噪音及燃油消耗考量，在英國機場降落之航機，使用持續下降操作進場程序情形日益普遍，此種進場程序讓航機於空中較高高度的時間較久，省去平飛階段，對發動機推力需求較少，使航機在最後進場階段燃油消耗顯著減少，排放因而減少，航機進場路徑上某些地區的地面噪音亦會降低^[9]。James Brooks(2006)表示持續下降操作是航機無須平飛而從相當高度下降之一種程序，可減少噪音、廢氣排放、燃油消耗及飛行時間^[10]。Javier Perez-Castan 等認為現行航機離場爬升程序可能包含數個平飛階段，使燃油消耗增加，除增加作業成本外，噪音及排放也隨之增加，持續爬升操作可避免此種無效率的爬升程序^[11]。英國民航局等多個單位共同研提之實務作業準則(2010)建議航機於離場階段採取持續爬升操作，即在航機爬升階段避免或減少平飛次數，讓航機儘速抵達巡航高度；而在空域結構及航情許可條件下，持續爬升操作為飛航管制員及航空公司預設之操作方式^[12]。Ozlem Sahin Meric(2015)評估採行 Point Merge 技術之航機下降剖面，研究結果顯示與傳統雷達引導方式相比，採行 Point Merge 技術可以達成較佳之航機下降剖面^[13]。周宗毅(2013)認為因全球溫室效應日益嚴重，航空業近年致力於研發持續下降操作(CDO)程序，期能帶來節能減碳、降低噪音及節省時間等效益，我國桃園機場曾於民國 102 年 5 月試行持續下降操作程序，未來仍須參考各方意見及不斷試飛並改進程序，始能更趨成熟^[14]。

S.M.L. Soepnel(2015)指出全球空運需求持續成長，航機延誤、擁擠及航空運輸對環境造成衝擊等問題，已成為機場管理者及航空公司最關注的問題，航空業致力發展新的工具系統及程序，期增進機場空側作業效率、容量及機場與航空公司之永續發展，航機電動滑行系統為發展中之一項創新方案。現行航機於機場空側之移動，須藉助地勤拖車或使用航機自身發動機提供動力，使用發動機提供動力對環境不友善，使用地勤拖車移動航機雖對環境較友善，但較不具時間效率。電動滑行系統屬綠色滑行系統，此創新方案主要於航機主起落架或鼻輪起落架裝設電動馬達，透過航機輔助動力系統(auxiliary power unit, APU)提供動力，航機無須使用主發動機或

地勤拖車即可移動及滑行，可增加航機於機坪後推及於滑行道滑行之效率、減少航機於地面階段之燃油使用量及對環境之衝擊；然電動滑行系統亦有缺失及問題待解決，主要在於電動滑行系統係於航機起落架加裝電動馬達，會增加航機重量，致航機飛行階段燃油消耗增加，恐因此抵銷航機地面滑行階段減少之燃油消耗，故須衡量所帶來之效益及所增加之成本，始可決定電動滑行系統是否值得投資，荷蘭皇家航空(KLM)及荷蘭阿姆斯特丹史基浦機場(Amsterdam Airport Schiphol)於評估使用電動滑行系統之效益時，主要以安全、容量/效率、成本及環境等 4 項指標評估^[15]。

Craig Lawson (2016)指出航機於地面之燃油消耗約佔全部的 6%，然許多機場航機滑行時間有日益增加情形，改用電動滑行系統，預估短程航班需攜帶之燃油至多可減少 4%，而目前發展中之綠色滑行系統主要為 WheelTug、Safran 及 TaxiBot 三種，WheelTug 及 Safran 係於航機起落架加裝電動馬達，TaxiBot 則類似無拖桿拖車，以機器手臂方式扣住航機鼻輪^[16]。Fabrizio Re(2017)認為航機地面作業是機場排放重要來源，因為傳統上航機滑行是利用發動機提供動力，並不具效率，而某些機載航機電動滑行系統在航機起落架加裝電動馬達提供動力，讓航機在地面自行移動，無須啟動發動機，然機載電動滑行系統會增加航機重量，恐減少航機飛行中之燃油效率^[17]。Hospodka Jakub(2014)則探討航機地面滑行系統 TaxiBot 之設計原理及優缺點^[18]，Parth Vaishnav(2013)認為改採電動滑行系統可減少作業成本及氣體排放，讓航空公司有經濟誘因^[19]。

2.2 小結

由於全球航空運量及需求持續成長，航空運輸對環境之衝擊日益引發關注，許多主要機場面臨設施容量擴增不易之困境，航空業爰致力於透過管理工具或調整作業模式等方式，提升作業效率及減少對環境衝擊，無論性能導航等航機操作技術與程序之應用，或各種航機電動滑行系統，各項精進作法或替代方案皆係著眼於航空之永續發展，目的在增進航機於機場空側之作業效率，並減少航機燃油消耗、飛行時間、噪音及廢氣排放。

三、航機離到場操作現況及發展趨勢

3.1 儀器飛航

航空器執行飛航任務之階段一般包括起飛、離場爬升、航路巡航、到場下降及降落等階段，臺北飛航情報區對各階段之飛航管制服務如圖 3-1^[20]，本研究有關航機離到場操作之探討主要著重在儀器飛航終端離到場部

分及部分儀器進場程序，含括離場爬升、到場下降及進場降落等三個階段。

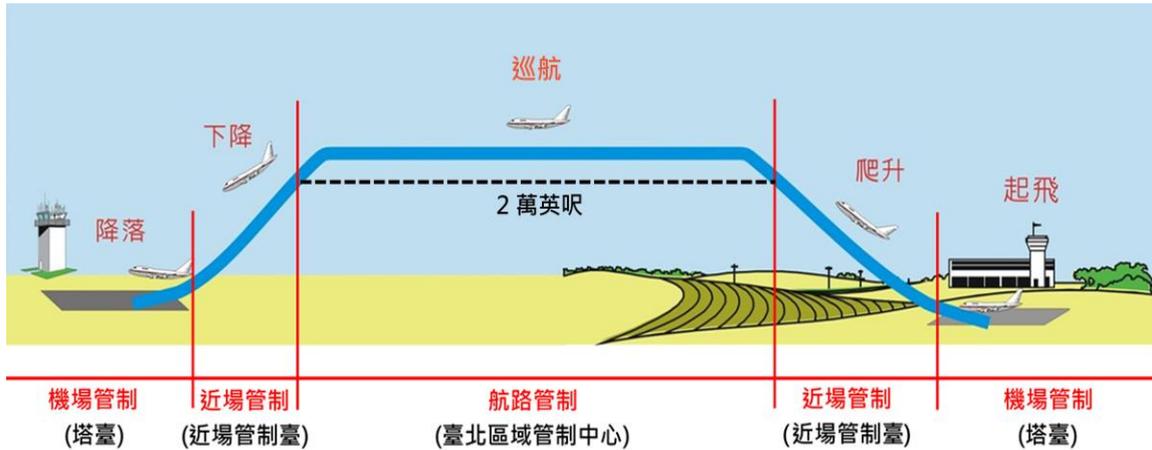


圖 3-1 臺北飛航情報區飛航管制服務示意圖

資料來源：交通部航空數位博物館網頁

除目視飛航外，民航機飛航一般採儀器飛航。所謂「儀器飛航」係指遵循儀器飛航規則之飛航^[21]，為航空器駕駛員依照機載設備及助導航設施指示之飛航操作，儀航程序為主管機關依照相關規範，仰賴助導航設備功能所設計具有順序性之預設飛航程序與航線，藉助適當助導航設備，引導航機保持與地面障礙物或其它航機之隔離。助導航設備可包含歸航台(Non-directional Radio Beacon, NDB)、多向導航台(VHF Omni-directional Range, VOR)、測距儀(Distance Measuring Equipment, DME)、儀器降落系統(Instrument Landing System, ILS)、雷達、慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)及全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)等。

儀器飛航程序依飛行階段區分，包含下列四種程序，以構成航空器自起飛機場飛航至目的地機場之飛行路線：

1. 標準儀器離場(Standard Instrument Departure, SID)：指頒訂之儀器飛航離場航線，連結機場或機場特定跑道與通常位於指定飛航服務航線上開始進行航路階段之特定重要點^[22]，係參考助導航設施功能所設計頒佈的飛航航線，以提供自起飛機場至航路之轉換程序。
2. 航路(Airway)：指於空中以通道形式設立之管制區域，主要以無線電助導航設施之連結而劃定。
3. 標準儀器到場(Standard Instrument Arrival, STAR)：指頒訂之儀器飛航到場航線，連結通常位於飛航服務航線上之重要點與已發布之儀器進場程序上之起始點，係參考助導航設施功能所設計頒佈的飛航航線，以提供自航路至終端區域內之儀器到場定位點之過渡程序。

4. 儀器進場程序(Instrument Approach Procedure, IAP)：指根據飛航儀表並保持規定之障礙物間隔所進行之一系列預定飛航操作。該飛航操作自最初進場定位點或指定之到場航線起始點起至能夠完成降落之一點止，此後，如不能完成降落，則飛至等待航線或符合航路障礙物間隔之某點位置。即為最終進場定位點至落地或至目視機場之一系列預設飛航程序，如 ILS 進場程序、NDB 進場程序等。

儀器飛航程序依導航特性區分，可分為下列兩種類型：

1. 傳統導航設施方式：利用歸航台(NDB)、多向導航台(VOR)、儀器降落系統(ILS)等傳統電台無線電信號所設計之程序，其飛航航線之構成係接收該些電台直線發射之無線電信號，或以距該些電台特定距離之圓弧來飛行，航線之劃設受到地面助導航電臺佈設與設備種類之限制，此等程序不易大幅更改或調整。
2. 性能導航(Performance Based Navigation, PBN)程序：利用慣性導航系統(INS)或全球衛星定位系統(GPS)等機載導航裝備所設計之程序，此等程序不受地面導航設施限制，為點對點(Point to Point)飛行，調整程序結構容易，為新一代儀器飛航程序之設計趨勢。

不論是標準儀器離場、航路、標準儀器到場或儀器進場程序，皆可採用傳統導航設施程序或性能導航(PBN)程序之方式構建。

3.2 現況

前提及儀器飛航程序依飛行階段區分，包含標準儀器離場、航路、標準儀器到場及儀器進場四種程序，以構成航空器自起飛機場飛航至目的地機場之飛行路線，航空器離到場操作主要涉及標準儀器離場、標準儀器到場及儀器進場等三種程序。

儀器飛航航空器之離場可分為直線離場程序、轉彎離場程序及全方位離場程序。儀器飛航航空器之到場基本上包括儀器到場程序及儀器進場程序，其中到場程序即前述之標準儀器到場(STAR)，運用於到場階段(Arrival Segment)；進場程序運用於進場階段，每一個儀器進場程序最多可能有四個進場階段，分別為最初進場(Initial Approach Segment)、中間進場(Intermediate Approach Segment)、最後進場(Final Approach Segment)及誤失進場(Missed Approach Segment)，各階段示意如圖 3-2：

1. 到場階段：在銜接航路與進場程序(並非所有程序皆包含此階段)。
2. 最初進場階段：介於最初進場定位點與中間進場定位點或航空器攔到中間進場航道或最後進場航道的進場點間的階段。階段功能在提供航空器調整至終端狀態(所有程序必須包含此階段)^[23]。

3. 中間進場階段：介於中間進場定位點或中間進場點與最後進場定位點間的階段。階段功能在提供航空器調整速度及外型以進行最後下降(並非所有程序皆包含此階段)。
4. 最後進場階段：介於最後進場定位點或進場點與跑道、機場或誤失進場點間的階段。此為到達跑道前之最後下降階段(所有程序必須包含此階段，且僅有唯一)。
5. 誤失進場階段：介於誤失進場點或到達決定高度點與以特定高度通過誤失進場定位點間的階段。階段功能在將航空器由最後進場狀態回復至爬升狀態，並將路徑銜接至待命點或航路定位點(所有程序必須包含此階段，且僅有唯一)。

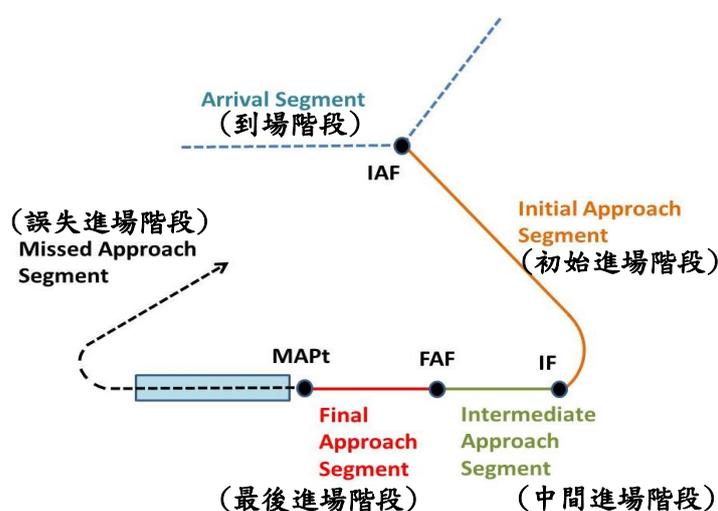


圖 3-2 儀器到場及進場程序階段示意圖

資料來源：陳翊巖

在航機離到場階段，通常採階梯式爬升或下降航機高度模式，管制員透過高度及速度指令，維持於機場起飛及降落之航機安全隔離，那些航管指令通常包含數個平飛階段，航空器在平飛階段需維持固定速度，需有推力以維持高度及速度，此種作業方式航空器飛航時間較長、燃油消耗及噪音較高，為航空永續發展，國際民航組織(ICAO)推動航機持續下降操作及持續爬升操作技術，如相關條件能配合，將有助提升航機效率，減少對周遭環境之影響。

3.2.1 持續下降/爬升操作

持續下降操作(CDO)與持續爬升操作(CCO)皆為航機操作技術，要達成該二項操作，必須從空域的設計、儀航程序的設計與飛航管制服務配合三個面向同時著手。

持續下降操作與持續爬升操作允許到場或離場的航機，儘可能地持續

下降或持續爬升，持續爬升操作讓航機能以最佳的發動機爬升推力與爬升速度，持續爬升到該機型最合適的巡航空層；持續下降操作係在可達成持續下降操作程序的環境配合下，讓航機儘可能保持在最佳巡航高度，避免或儘量減少階梯式平飛階段之下降路徑，使航空器以最小發動機推力直接抵達最後進場航點。持續爬升操作與持續下降操作於不影響飛安的條件下，對環境保護具有潛在效益，包括節省能源、減低噪音及廢氣排放，國際民航組織(ICAO)於 2010 發布持續下降操作手冊(ICAO Doc 9993)與持續爬升操作手冊(ICAO Doc 9931)，提供持續下降及持續爬升操作規範，期順遂其推展與執行。

歐盟飛航服務機構 Eurocontrol 認為航空器噪音及排放限制機場發展，並增加作業成本，實施航機持續下降可幫助減少該些問題，持續下降操作其實是一種航機操作技術(如圖 3-3)，到場航機以發動機最小推力從適當位置下降，在安全操作及符合相關程序與航管指示前提下，儘可能減少平飛階段。

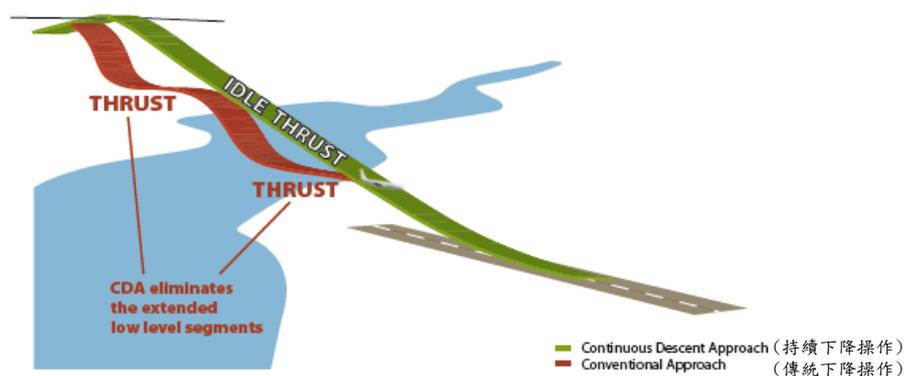


Figure 1 - Conceptual Diagram of "CDA"

圖 3-3 持續下降操作示意圖

資料來源：Eurocontrol 網頁

英國民航局表示在英國機場降落之航機，因噪音及油耗考量，使用持續下降操作情形日益普遍，因採用此種程序時，航機於空中較高高度的時間較久，直至攔上儀器降落系統(ILS)訊號準備降落前，採持續下降操作而省去平飛階段，讓發動機推力需求較少，使航空器在最後進場階段燃油消耗顯著減少，排放即減少，航機進場路徑上某些地區的地面噪音亦會降低；但如採傳統進場程序，航機依據管制員的指令，自高度 6 千或 7 千呎開始先下降至 3 千呎，然後平飛一段時間，始攔截儀器降落系統(ILS)訊號準備降落(如圖 3-4)，換言之，持續下降操作是在航機下降階段避免或減少平飛次數，而從相當高度直接下降之一種程序，可減少噪音、排放、燃油消耗及飛行時間。同樣地，航機於離場階段採取持續爬升操作，就是在航

空器爬升階段避免或減少平飛次數，讓航機儘速抵達巡航高度，如此可減少燃油消耗及排放。持續下降/爬升操作雖可減少噪音、排放、燃油消耗，但實際減少量會因機型及操作技術與程序之不同而有所差異。

綜言之，航機持續下降操作具有之優點包括：

1. 相較傳統進場程序，使用持續下降操作程序時，航機於空中較高高度之時間較久，進場路徑上某些地區地面噪音會減少，視地點及機型不同，噪音至多可減少 5 分貝；
2. 減少或排除航機平飛，減少發動機推力需求；
3. 發動機動力需求較少，最後進場階段燃油消耗顯著減少，排放隨之減少。

然而持續下降操作亦有使用上之限制，例如：

1. 使用持續下降進場程序，地面上仍會有噪音問題；
2. 僅限距跑道頭 10-25 哩處噪音量會減少，最後進場階段之噪音，與使用傳統進場程序並無差別；
3. 對機場等噪音線範圍及形狀並無顯著影響；
4. 可能會因空域限制或安全考量而無法使用；使用時也可能為減速或調整航機外型所需，而仍有平飛階段。

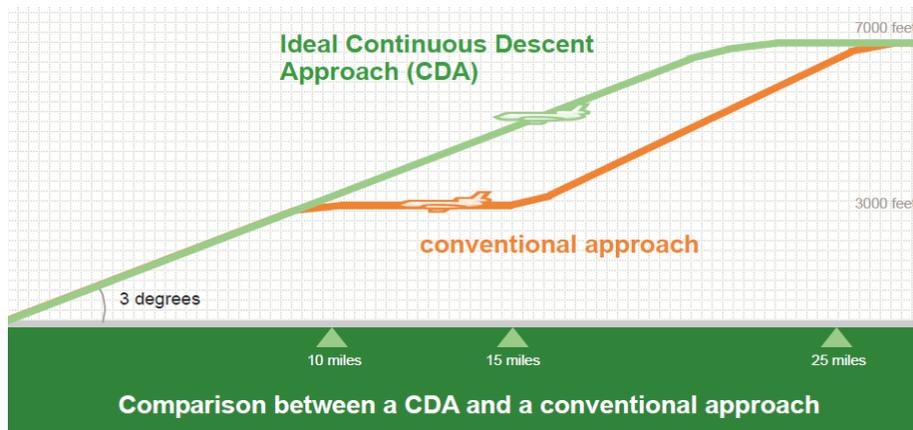


圖 3-4 傳統下降及持續下降操作示意圖

資料來源：英國民航局

美國 MITRE 公司曾針對航機持續下降/爬升操作之效益進行研究，所獲致結論為：如在全美機場實施持續爬升/下降操作，作業成本約可節省 3.8 億美元，其中 90% 之效益來自於持續下降操作，10% 來自持續爬升操作，持續爬升操作帶來之效益之所以僅佔 10%，主要係因在空域結構及航情許可條件下，持續爬升操作為管制員及航空公司預設之操作方式，故航機離場程序基本上已具相當效率；至於排放方面，每年二氧化碳及硫化物排放分別能減少 850 公噸及 216 公噸。歐盟飛航服務機構 Eurocontrol 之研究顯示，最適的推行持續爬升/下降操作帶來的效益將可節省 35 萬噸燃油消

耗(約 1.5 億歐元)，而與傳統進場操作方式相較，持續下降操作可減少噪音 1~5 分貝^[24]。以倫敦 Heathrow 機場為例，每日 1,300 架次航機起降，85% 到場航機使用持續下降進場程序，該機場認為如使用持續下降程序進場之航機增加 5%，可減少碳排放 1 萬噸及燃油成本 200 萬歐元^[25]。美國喬治亞理工學院以區域航行(RNVA)程序分析持續下降操作帶來之效益，在噪音部分，尖峰噪音至多可減少 6 分貝，等噪音線區域最多減少 30%；在排放部分(高度 3 千呎以下)，一氧化碳、碳氫化合物及一氧化氮最多可分別減少 20%、25%及 35%；B757 及 B767 型機之燃油消耗平均減少 118 磅及 364 磅；B757 及 B767 型機飛行時間平均減少 118 秒及 147 秒。

持續下降操作誠然可帶來相當效益，國際民航組織亦對其實施提出重要建議原則，包括：

1. 持續下降操作不應違反安全、容量、飛航效率、快捷之原則，應視為一儘可能完成之目標，但並非不計一切代價；
2. 持續下降操之設計亦須考量離場航機儘可能不受限制持續爬升，以節省燃油消耗、避開人口稠密區及噪音敏感區等因素，因此各項因素綜合考量後勢必須有所折衷；
3. 持續下降操作應視為一儘可能完成之目標，不應對容量帶來負面影響，初期運用應以簡單為原則，並儘可能基於過去作業之經驗，此一作業原則未來應逐步納入新科技^[26]。

3.2.2 性能導航

性能導航(Performance-Based Navigation, PBN)為航空器於特定飛航服務航線、儀器進場程序或指定之空域內運作時，指定其導航性能規格(Navigation Specification)之一種航行方式。ICAO 在第 9613 號文件(Performance-Based Navigation (PBN) Manual)中列出幾種 PBN 主要運用的導航性能規格^[27]，相對應之儀航程序設計規範分別置於 ICAO 第 8168 號文件^[28]及第 9905 號文件^[29]。

PBN 主要是由助導航基礎設施、導航性能規格及導航應用三項要素構成，分述如下：

1. 助導航基礎設施(NAVAID Infrastructure)：係以陸基(ground-based)或星基(space-based)之助導航設施為建置基礎，其中陸基助導航設施包括測距儀(DME)及多向性導航臺(VOR)等；星基則以衛星導航(Global Navigation Satellite System, GNSS)為主，包括 GPS、GLONASS 及歐盟之 Galileo 等衛星定位系統。
2. 導航性能規格(Navigation Specification)：用以指定航空器於特定空域內之

航路、儀器程序作業時，對航空器裝備及飛航組員之作業要求，其規格內容通常以精確度(Accuracy)、整合度(Integrity)、持續性(Continuity)及有效性(Availability)等項目界定^[30]。

3. 導航應用(Navigation Application)：係指在符合空域概念(Airspace concept)下，將前述導航性能規格，配合可使用之前述導航設施，應用於特定航路(ATS route)、儀航程序，及/或某一定義之空域範圍內之作業，亦即應用於在到場、進場、航路或離場程序。

傳統儀航程序須依賴地面助導航電臺之信號飛行，因地面電臺涵蓋範圍有限，或受到地障遮蔽信號影響，故航路之劃設及離到場儀航程序之設計，皆受地面助導航電臺佈設與設備種類之限制。性能導航(PBN)為一種航行之方式，航空器在地面電臺之涵蓋範圍內，參考地面電臺，或利用本身機載裝備，或混合利用以上兩種裝備，飛行於任何計劃之航線上，其程序是由以經緯度所定義的航點 (waypoint)所構成，原則上航點可設於任何地理位置，且任何兩個航點相連即可構成一飛行路線，其所能設置之飛行路線與傳統儀航程序相較下，較不受地面助導航設施之限制，程序結構之調整容易。

PBN架構下的導航性能規格分為區域航行(aRea NAVigation, RNAV)及導航性能需求(Required Navigation Performance, RNP)2大類，主要差別在於RNP規格具備機載監視及告警系統(On-Board Performance Monitoring and Alerting, OBPMA)，RNAV規格則未具備。導航性能規格可加上一數值指定其導航精確程度，例如RNAV 5、RNAV 2、RNP APCH(指航機無須ILS協助即可進場)等為實際運用之規格，不同飛航階段可運用之導航性能規格如圖3-5^[31]，圖3-6之A、B、C分別呈現以傳統助導航設施、RNAV及RNP規格為基礎所劃設之航路，其中A之航路範圍較寬，路線較曲折而長；B之航路範圍相對較小，路線不似前者曲折；而C之航路範圍最小，路線相對較短。

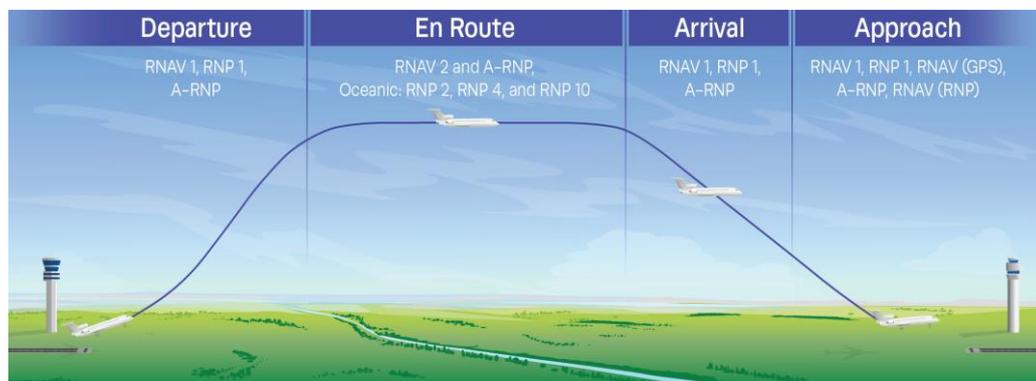


圖 3-5 飛航階段可運用之導航性能規格
資料來源：FAA 網頁

Moving To Performance-Based Navigation

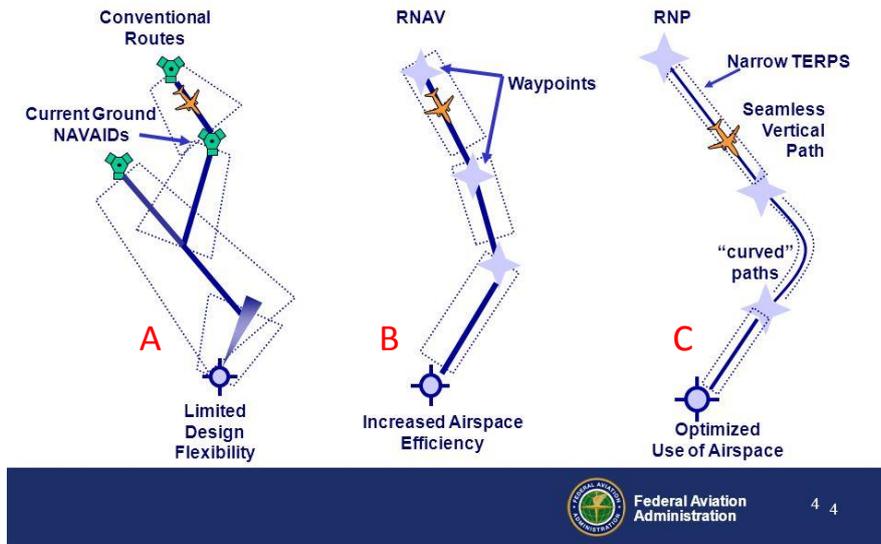


圖 3-6 以傳統助導航設施與以 PBN 為基礎所劃設航路差異
資料來源：FAA 網頁

PBN 技術係利用衛星的定位能力及先進的航空器導航設備，讓航機以較短、較有效率的路徑飛抵目的地，美國 NextGen 計畫及歐盟 SESAR 計畫皆將 PBN 技術視為提升機場運作效能的解方，例如於檢討多跑道同時運作之隔離標準時，導入 RNP 技術，或將 RNP 技術與傳統儀器降落系統(ILS)進場程序結合等^[32]，美國聯邦航空總署(Federal Aviation Administration, FAA)目前已規劃超過 9,000 個 PBN 的程序及航路，可節省航機航行時間及燃油消耗，同時減少排放^[33]，該些 PBN 程序及航路主要集中在全美 11 個大都會區(如圖 3-7)，該些都會區的空域擁擠，需同時提供區內數個機場使用，藉由 PBN 程序及航路之實施，讓擁擠的終端空域有較大的運用彈性。

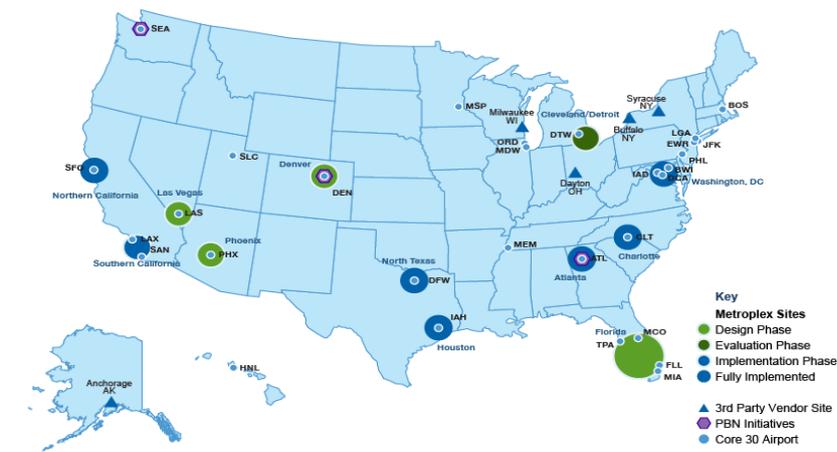


圖 3-7 實施 PBN 程序及航路之都會區圖
資料來源：FAA 網頁

美國 FAA 管理之 2,684 個機場中，每個機場都有規劃至少一個標準儀器進場程序(IAP)，其中 95%的機場規劃有至少一個 PBN 標準儀器進場程序(PBN IAP)。2009 年到 2016 年間，FAA 發布的 RNAV 進場程序(RNAV approach)總數由 3,659 個增為 5,795 個，RNP 進場程序(RNP approach)總數則由 125 個增為 391 個。至於離到場程序部分，2009 年以來 RNAV 標準儀器到場程序(RNAV STAR)增加 264 個，總數達 355 個；RNAV 標準儀器離場程序(RNAV SID)增加 338 個，總數達 549 個(如圖 3-8)。

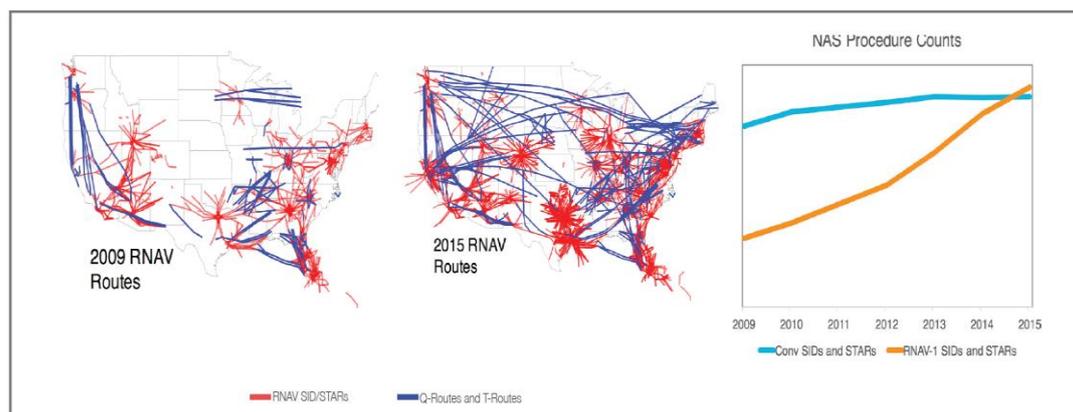


圖 3-8 PBN 標準儀器離場與標準儀器到場數量增長比較
資料來源：FAA 網頁

3.3 發展趨勢

全球航空運量及航班持續成長，諸如機場跑道容量、空域等均日漸飽合卻擴增不易，飛航管制服務面臨不少壓力及挑戰，隨著科技進步，航機機載裝備日新月異，在既有運作技術及基礎上，已發展出新的操作技術或應用模式。

3.3.1 Point Merge

相較於傳統的航機到場採階梯式下降方式，直到銜接上機場的儀器降落系統(ILS)之儀降程序，採行持續下降操作方式，使航機可以穩定的下降角度進場，優點為較低的引擎油耗、較輕微的空氣汙染以及較少的噪音。然而，持續下降的操作取決於空域、安全等等相關因素的配合，晚近持續下降操作發展多集中於中低航行量的機場較易獲致成效，高航行量機場持續下降的實作易受機場運量的影響，整體成效反而有限。

針對持續下降操作此施行上之限制，國際間已發展出一個解決方案，稱之為 Point Merge 技術，藉由 Point Merge 技術搭配持續下降操作操作，在擁擠及高運量機場的空域環境下，航機也能順利進行持續下降操作，進而帶來低油耗、低空污與低噪音等益處，歐洲的奧斯陸機場與美國部分機

場都已採行此技術，實績也證明確實獲致相當的效益^[34]。

Point Merge 技術主要由一個 Merge Point 與一個(或以上)的 Sequencing Legs 所構成，Sequencing Legs 係以 Merge Point 為圓心，不同半徑所畫成之同心片段圓周，同一個 Sequencing Leg 上的任一點到 Merge Point 的距離都相同，相鄰 Sequencing Leg 間以垂直間隔(通常為 1,000 呎高度)予以隔離。到場航機依其到場方向循序加入特定的 Sequencing Leg 後，循著 Sequencing Leg 飛行，當與同個 Sequencing Leg 上其他到場航機取得隔離後，航機會在管制員的引導或到場程序的設計點轉彎朝向 Merge Point 航行，Merge Point 是所有到場航機都會經過的點。航機在轉彎離開 Sequencing Leg 後，就開始執行 CDO 操作，直到銜接上機場的儀器降落系統(ILS)儀降程序，最後降落於機場跑道(圖 3-9)^[35]。

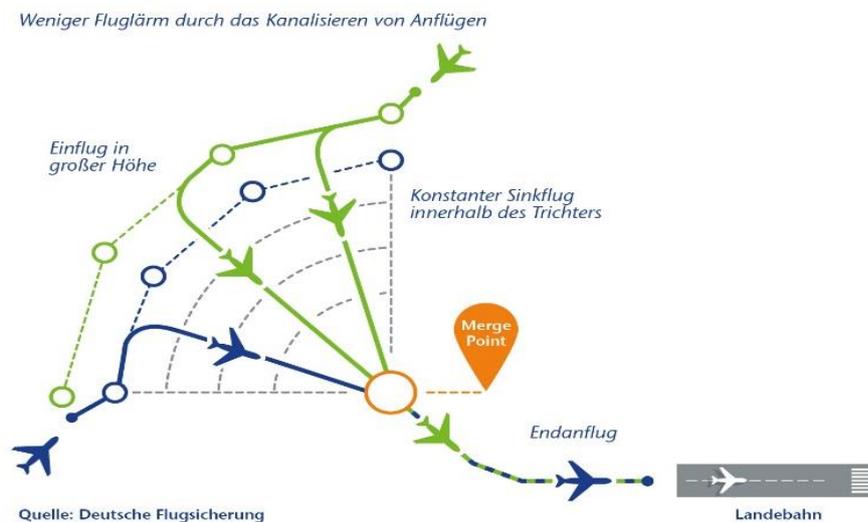


圖 3-9 Point Merge 概念
資料來源：Fraport AG 網頁

在複雜且航行量高的終端管制空域中，傳統的到場航機排序方式，主要由管制員以雷達航向引導方式來達成，由不同方向進到終端管制空域的航機，藉由管制員對每一架航機提供之雷達航向引導，達成將所有航機依先後次序依序排序，引導航機下降高度到攔上機場的儀器降落系統(ILS)儀降程序。就此情境下，能否有效率地將航機排序取決於管制人員的管制技巧，但可確定的是，管制員的工作負擔將較為沉重，因為頻繁的航向引導必須靠管制員以無線電語音與駕駛員溝通，故駕駛員的工作負擔也相對地增加，同時駕駛員在航機的操作上也失去彈性，對於採行持續下降操作方式也變得較不易達成。

採行 Point Merge 技術，藉助航機 PBN 的導航能力以及到場程序設計

時隔離考量，管制員只要引導航機到達 Sequencing Leg，其後航機均依照本身的機載設備 PBN 能力依儀航程序飛行，管制員與駕駛員間不需再進行相關的無線電聯繫，駕駛員也更易於預先規劃後續的持續下降操作，圖 3-10 為大倫敦地區採 Point Merge 技術之航跡圖^[36]。



圖 3-10 大倫敦地區採 Point Merge 技術之航跡圖
資料來源：RocketRoute 網頁

在繁忙的終端管制空域內，雷達航向引導係將到場航機匯流與排序，以便將航機交到塔臺管制員手上依序落地的普遍方式，管制員必須在短暫而關鍵之時間內，迅速做出正確判斷；相對地，航機駕駛員也必須在短暫時間內，依據管制員的指令執行對應之航機操作。在此情境下，可以歸納出幾個採行雷達航向引導可能帶來的缺點，包括無線電溝通頻繁(易於出錯)、航機飛行軌跡缺少可預測性(難於直覺地排序)、航機無法維持最佳的下降操作等。比較 Point Merge 與雷達航向引導兩種方式之航機下降剖面，採行 Point Merge 技術，航機在轉彎離開 Sequencing Leg 後即開始執行持續下降操作(CDO)，航機的下降剖面較為平順(圖 3-11)，同時也較易獲致低油耗、低空污與低噪音等等的好處。

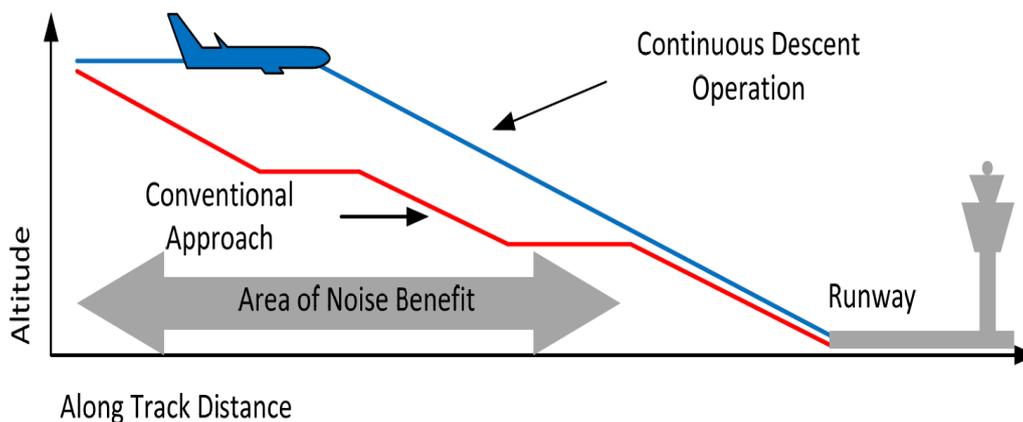


圖 3-11 航機下降剖面比較圖
資料來源：Ozlem Sahin Meric 等

Point Merge 技術運用於複雜的空域與高運量之機場，其效果已獲致實績驗證。歐盟資料顯示，愛爾蘭都柏林機場與挪威奧斯陸機場於採行 Point Merge 技術後，有效提升了複雜的終端空域之運作效率，搭配 CDO 的操作，可獲致低油耗、降低空氣汙染以及噪音的成效。

3.3.2 性能導航新的應用

性能導航(PBN)係航空器於特定飛航服務航線、儀器進場程序或指定之空域內運作時，指定其導航性能規格之一種航行方式，在此基礎上目前已發展出新的應用模式，包括：

1. 平行跑道運作方式(Parallel Runway Operations)

導入 PBN 技術後，雙跑道平行獨立進場操作對於兩條平行跑道間距之要求，可由原要求之兩條跑道間距必須大於 4,300 呎，縮減到只要大於 3,600 呎即可。越來越多的機場採行 PBN 技術以將機場本身之跑道配置做最有效率的規劃安排，如此可以增加航機到場的流量，同時也獲致省油耗、低排放的效果。

2. 等效水平隔離操作(Equivalent Lateral Spacing Operations, ELSO)

此項操作是應用 PBN 程序的飛航路徑具可預測性的特性，將航機離場時之分歧角隔離規定，由原本的最小 15 度角縮減到 10 度角，如此可增加額外的離場路徑及提升機場的運作流量，圖 3-12 為美國亞特蘭大機場應用實例。

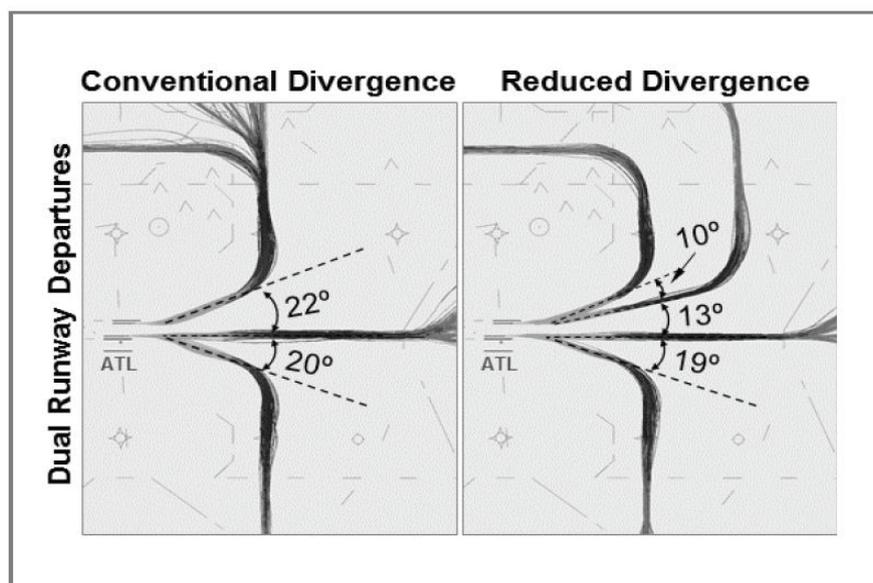


圖 3-12 亞特蘭大機場航機離場分歧角縮減前後圖示
資料來源：FAA 網頁

3. A-RNP(Advanced RNP)

前提及 PBN 架構下的導航性能規格分為區域航行(RNAV)及導航性

能需求(RNP)規格兩大類，主要差異在是否有機載監視即告警系統，RNAV 多數運用於航路及離到場階段，RNP 多數運用於進場階段，Advanced RNP 乃新一代的導航性能規格，基本上係架構於既有的 RNP 導航性能規格上，然後強化一些特性，使 Advanced RNP 可進一步適用於飛行的每一個階段，包括航路、離到場、進場及誤失進場等(圖 3-13)。

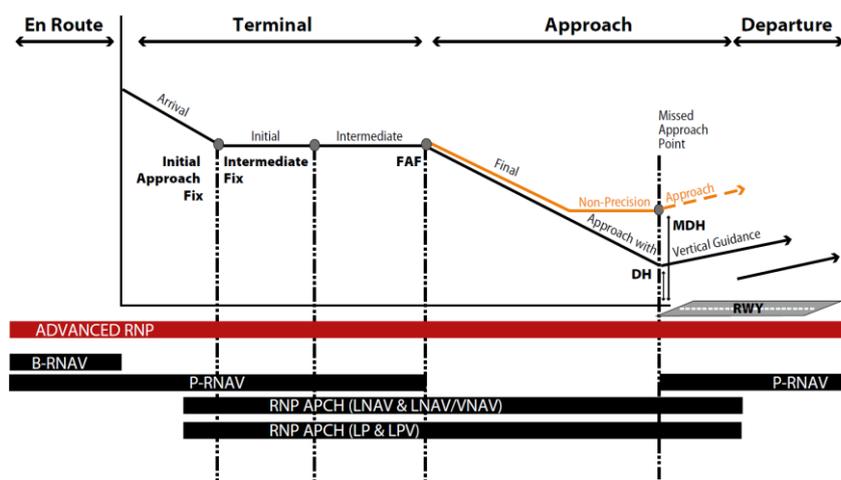


圖 3-13 A-RNP 適用於飛行各階段示意圖

資料來源：Eurocontrol

4. Trajectory-Based Operation

基於軌跡之作業(Trajectory-Based Operation, TBO)為美國 FAA 之說法，歐盟稱為 4D Trajectory Operations，係在三維空間之航機軌跡中加入時間因素的一種航機操作方式(圖 3-14)^[37]，主要運用航機的 PBN 能力，再加上縝密的航管作業協調，最終達成航機自由飛行的目的。實務作業上，如果航機機載設備可以讓航機精確地飛行於特定路徑，且能掌控通過每個航點的時間，配合空中與地面系統間飛航情報的充份交換，TBO 可以讓航機以最適的航跡進行自由(無限制)飛行。在將空域系統最佳效能與航機駕駛員的喜好都納入考量後，TBO 可以讓航機在預先協調好的 PBN 飛航路徑上飛行。

TBO 是國際間對於 2025 年飛航管理系統的普世概念，以四維度的航跡、開門到開門(gate to gate)的概念管理航機運作，其中四維度的航跡包含一系列航機由離場至到場間的航跡點，每個航跡點由水平(經緯度座標)、垂直(高度)與時間等資料所組成。TBO 可說是歐美新一代飛航管理系統計畫(美國 NextGen 與歐盟 SESAR)最重要的基石，意味著飛航作業的重大轉變，由系統綜整航機目前所在位置與未來位置，再搭配時間參數，經精密計算後以達到較高程度的航行自動化目標，航機飛行的安全

隔離，即透過此高度精密的自動化作業達成。此種作業帶來之效益包含：

1. 大幅增加航情可預測性，可改善空中交通之運作；
2. 航空公司航機可選擇最適之飛航空層與路徑；
3. 減少碳排放；
4. 節省成本(油耗與時間)；
5. 增加容量(航路與機場)，使管制員可安全地提供更多航機航管服務；
6. 因航情衝突減少與飛航情報之預先溝通，使管制員工作得以簡化。

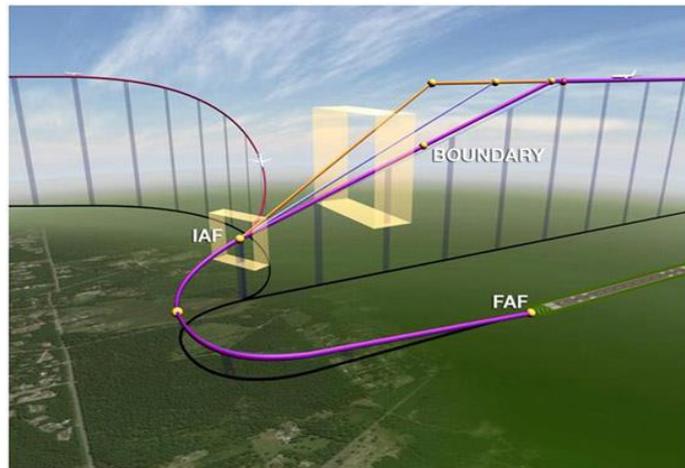


圖 3-14 TBO 航跡示意圖

資料來源: Concepts Beyond網頁

5. RNP to ILS

RNP to ILS 技術是運用航機具備 PBN 能力，於進場階段規劃 RNP 程序，然後攔上機場儀器降落系統(ILS)進場程序(如圖 3-15)，此技術可達到縮減航機飛行距離、避開人口稠密區域及增加機場容量的效益，美國 FAA 稱之為 EoR(Established on RNP)。藉由此項技術之應用，管制員可以許可航機 RNP 進場操作，相鄰兩跑道間的航機，可以不受垂直高度 1,000 呎及水平距離 3 海浬之隔離標準限制。此隔離標準之改變，使航機可以在較短的距離時即可轉彎對正跑道落地，可節省航機飛行里程、燃油消耗及減少碳排放，同時達到增加機場容量的效果。圖 3-16 為美國丹佛機場(Denver)施行 RNP to ILS 相關航跡圖，其中紅色部分為航機採傳統進場程序之航跡，雷達航向引導航機在距跑道頭 16 海浬處開始轉彎對正跑道，綠色部分係採行 RNP to ILS 進場程序之航跡，航機在距跑道頭 10 海浬處即可開始轉彎對正跑道降落。

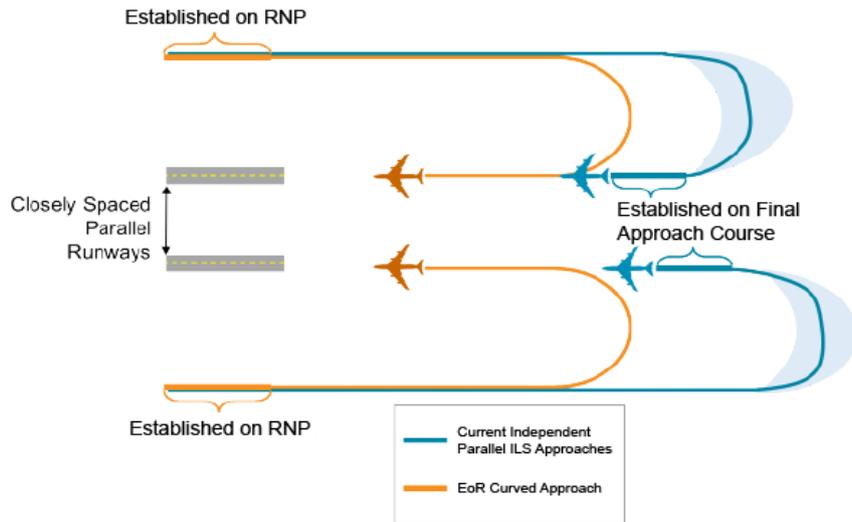


圖 3-15 以 RNP 程序攔上機場 ILS 進場程序路徑圖
資料來源：FAA 網頁

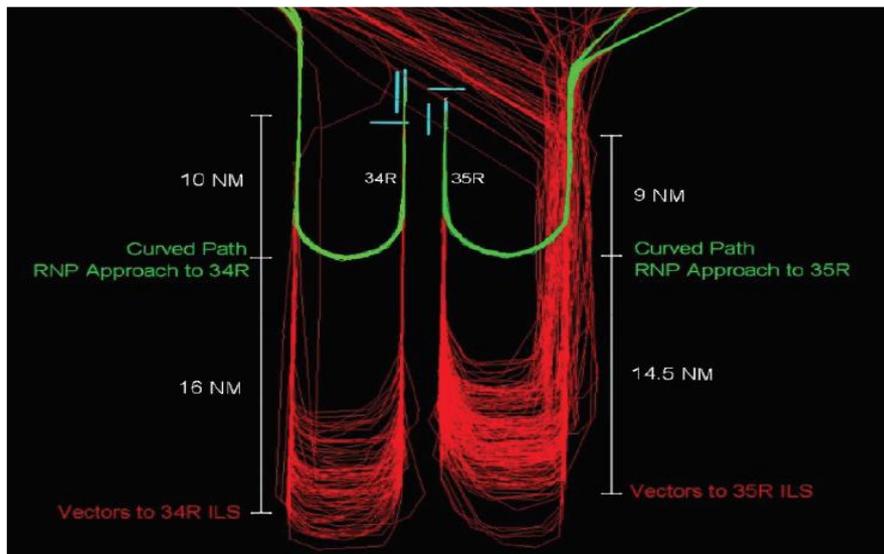


圖 3-16 丹佛機場施行 RNP to ILS 相關航跡圖
資料來源：FAA 網頁

3.3.3 小結

隨著科技進步，航機機載裝備日新月異，在既有運作技術及基礎上，發展出新的操作技術或應用模式，例如 NextGen 與 SESAR 同步研擬的 PBN 技術最新運用所包含之 RNP to ILS 等技術，或可適度紓緩機場跑道容量、空域日漸飽合問題。

3.4 我國應用情形

民用航空局於 102 年 5 月 6 日發布飛航指南(Aeronautical Information Publication, AIP)，公告桃園國際機場試行到場持續下降操作七個月，試行時段為每日 1700-2300UTC，該試行時段大部分為桃園國際機場航行量較低

的時段，且部分時段與桃園機場跑道關閉巡場或施工的時段相重疊。後續民航局參酌試行階段之成效及新加坡樟宜機場做法，發布飛航指南(AIP)公告於102年12月12日起於夜間離峰時段實施到場持續下降操作，相關作業程序公布於臺北飛航情報區飛航指南(AIP)桃園國際機場第2.22.3節「到場持續下降操作(CONTINUOUS DESCENT OPERATION, CDO)作業」中。

依據民航局發佈之飛航指南，航機於桃園機場實施到場持續下降操作作業，相關內容詳如下：

(一)實施持續下降操作應具備之條件：

1. 降落跑道之儀器降落系統須正常運作；
2. 降落跑道之跑道視程未低於 ILS 進場程序 CAT I 之最低標準；
3. 全球衛星導航系統及 ILS 儀器降落系統無降等情形；
4. 持續下降操作適用時段：每日 1700UTC 至 2300UTC。

(二)各航機應具備之要件：

配備 RNAV 且具有以下飛航處理電腦功能之航空器，航管得依航情允許其實施持續下降操作：

1. 左右導航與垂直導航；
2. 區域航行標準儀器到場程序連結 ILS 進場程序，並依規劃之垂直路徑持續下降。

(三)持續下降操作之準備：

為確保有效實施持續下降操作，駕駛員應遵守以下事項：

1. 確認是否符合持續下降操作之條件，
2. 確認航機是否具備實施持續下降操作之能力；且
3. 根據進入飛航情報區之航點與降落跑道，於航機飛航處理電腦規劃航線。終端資料自動廣播服務將提供降落跑道資訊^[38]。

因我國民航空域較為狹窄且與軍方空域多所重疊，須於航行量較低且行情能配合的條件下，才比較有可能實施持續下降操作。經洽民用航空局飛航服務總臺管制單位瞭解，於可以施行持續下降操作的時段內，只要航機駕駛員提出需求，管制員通常會審酌航情與空域狀況，儘力促成持續下降操作的作業。

參據民航局「臺北飛航情報區性能導航(Performance-Based Navigation, PBN)實施計畫」，我國在 PBN 相關導入時程上，基本上與美國下一代航管系統計畫(NextGen)所規劃的時程相當，相關的 PBN 實施期程與建置內容如下所示：

表 3-1 臺北飛航情報區性能導航導入期程規劃^[39]

	近程(~2012)	中程(2013~2019)	長程(2020~2025)
航路	規劃部分航路為 RNAV 航路	<ul style="list-style-type: none"> • 視需要推動航路運用 RNAV 5 • 航行量較高之航路運用 RNAV 2 	推動航路運用 RNP 2，並與鄰區密切協調合作
離到場程序	桃園、高雄、松山採用 RNAV 1	<ul style="list-style-type: none"> • 各機場儘可能全面採用 RNAV 1 • 特定機場視需要採用 CDO 等技術 • 考慮具 PBN 能力者給予較優先順序 	桃園、高雄、松山採用 RNP 1
進場	完成 8 個機場之 16 個 Baro-VNAV 進場程序	<ul style="list-style-type: none"> • 評估其餘機場/跑道 Baro-VNAV 之可行性 • 特定機場經評估如有效益，則採用 RNP APCH 或 RNP AR APCH 	特定機場經評估如有效益，則採用 RNP AR APCH 或 GLS CAT I/II

資料來源：飛航服務總臺

經檢視，在近程的「航路」目標中，臺北飛航情報區已完成部分航路為 RNAV(RNP)航路，主要有 M646(RNP 10)航路、M750(RNAV 5) 航路、N892(RNP 10) 航路、Q11(RNAV 2) 航路、Q12(RNAV 2) 航路、Q13(RNAV 2) 航路及 Q14(RNAV 2)等。在近程的「離到場程序」目標中，桃園、高雄與松山等三個主要國際機場均已提供區域航行(RNAV 1)之離到場程序供航機操作使用。至於在近程的「進場」目標中，民航局已提供 Baro-VNAV 進場之機場包括桃園、松山、臺中、嘉義、臺南、高雄、花蓮、馬公等機場。

綜上所示，民航局於「臺北飛航情報區性能導航(Performance-Based Navigation, PBN)實施計畫」所揭示之近期目標，相關工作項目均已完成。

3.5 小結

隨著全球航空運量及飛航班次持續成長，然機場跑道、空域等擴增不易，透過不同的操作技術或應用，例如避免或儘量減少平飛次數之持續爬升/下降操作、運用航機性能導航特性之平行跑道運作等，期藉此提升運作效率及減少對環境之衝擊。

四、航機地面操作現況及發展趨勢

航機執行飛航任務時，除於空中飛行外，起飛前及降落後係於停機坪及跑道之間往返，隨著全球對航空運輸之需求增加，天空開放漸為全球趨

勢，航空業者除增加飛航班次外，也開闢許多長短程新航線，而低成本航空公司(Low Cost Carriers, LCC)近年蓬勃發展，尤以亞洲地區為甚，全球主要機場起降航班大幅增加，致機場擁擠或停機坪不足問題日漸嚴重，航班延誤隨之而來，為減少航班延誤提升準點情形，有航空公司甚或悄悄增加地停時間，使航機使用率降低，此意味著在原有機隊數基礎上，可以派飛之班次數必須減少。此外，航空運輸及機場對環境造成之衝擊日益引發關注，機場相關設施容量擴增不易，如何提升航機於機場空側的作業效率，例如：縮減航機佔用停機坪時間及往返停機坪與跑道間的滑行時間，為航空業目前努力的方向之一，航機電動滑行系統技術之創新發展因此應運而生。

4.1 現況

依現行作業模式，航機於機場空側之移動，其中航機滑行係靠本身發動機提供動力，而航機之拖移則依賴地勤拖車。航機在停機坪完成地勤相關作業後，必須由地勤拖車將飛機後推離開停機坪，依規定後推至定位再啟動發動機(實務作業上，因機場場面配置關係，航機可能在後推同時先啟動一具發動機，以免後推至定位再啟動會擋住滑行道過久時間，影響在其後之航機)，等到檢查程序及暖車完成，地勤拖車脫離後，即可利用自身發動機之動力自行滑行至跑道頭等待離場，此為 taxi-out 階段；至於航機降落脫離跑道後，係繼續依賴發動機動力滑行，直到指定的停機坪停妥後，始關閉發動機，此為 taxi-in 階段。

以航機在停機坪的後推作業來說，為節省燃油成本，航機關艙門後推離開停機坪時，發動機未啟動，航機依賴地勤拖車後推。目前地勤拖車分為有拖桿及無拖桿兩類，必須依據航機機型及大小使用合適的拖車，有拖桿拖車之拖桿(如圖 4-1)必須接妥於航機鼻輪之拖桿接座(如圖 4-2)，而無拖桿拖車(如圖 4-3)係利用機械手臂將航機鼻輪夾住後抱起拖行(如圖 4-4)，操作上較為方便，但造價相對也高很多。地勤拖車後推航機時，因為所操控的是飛機鼻輪，即使是小角度的變化，也會造成飛機其他位置(如機翼等)長距離之位移，故執行相關作業時，地勤拖車駕駛人員必須隨時注意翼尖觀測員所反映之狀況，適時妥適處理，以免發生飛機與外務碰撞造成飛機損傷之情事^[40]。



圖 4-1 有拖桿地勤拖車(左)及拖桿(右)
資料來源：桃園航勤公司(左)及本研究整理



圖 4-2 拖車拖桿接妥於航機鼻輪
資料來源：本研究整理



圖 4-3 無拖桿地勤拖車(左)以機器手臂夾住鼻輪(右)
資料來源：桃園航勤公司



圖 4-4 無拖桿地勤拖車準備將航機後推
資料來源：桃園航勤公司

在旅客登機、航機加油/加水/餐點等裝載作業完成，航機關艙門/撤離空橋後，即由地勤拖車駕駛操控拖車，緩緩後推航機離開停機坪(如圖 4-5)，後推到定位時地勤拖車脫離，待獲得航管許可，航機即開始利用本身發動

機動力自行滑行到跑道頭等待離場。相較於航機發動機提供動力方式，地勤拖車後推航機排放較少，對環境相對較為友善，然拖車後推航機速度較慢(以桃園機場為例，後推速度每小時不超過5公里^[41])，較不具時間效率，如遇天候等因素，可能有多架航機同時要後推，地勤裝備恐不及因應，致航機需在停機坪等待，除將增加地面停留時間、影響航機準點，也可能使航管許可航機開始滑行之順位往後延，航機延誤情形恐更惡化。



圖 4-5 地勤拖車將航機後推離開停機坪

資料來源：自由時報

航機如因各種因素致實際地停作業時間較表訂時間增加，機場航班即可能有延誤情事，如能減少航機在地面的時間，可能就有機會解決部分問題，此意味更有效率的航機滑行作業方式有潛在的需求與機會。另前提及航空公司營運成本中 30%~40% 為燃油成本，其中 6%~10% 的燃油為航機在地面階段所消耗，如果有其他替代方案，讓航機無須依賴地勤拖車，能自己滑行後推離開停機坪，甚或在不啟動發動機的情況下，可繼續滑行到跑道頭等待離場起飛，既可增加航機在機坪的自主性、節省地停作業時間，也能減少燃油消耗及廢氣排放量，兼顧環境友善及永續發展，航機電動滑行系統的概念因此產生。

以航機於滑行道滑行作業來說，據 Cranfield 大學的研究，航空公司 6% 的燃油係消耗在地面上(包括滑行)，以波音 B737 及空中巴士 A320 二機型為例，以單發動機滑行時，滑行作業通常需使用 200 公斤燃油，而倫敦希斯洛機場 2002 年之氮氧化物排放中，56% 係來自航機於地面之排放，由於許多機場航機滑行時間有日益增加的情形，此意味著航機於機場之燃油消耗將增加，排放亦將隨之增加。以美國紐約甘迺迪 (JFK)、紐華克(EWR)、拉瓜迪亞(LGA)及費城機場為例，圖 4-6 為 2003-2007 年期間該些機場 taxi-out 時間變化情形，該段期間美國機場平均滑行時間並無顯著變化，然紐約甘迺迪、紐華克、拉瓜迪亞等三座機場航機滑行時間則有顯著增加情形，特別是紐約甘迺迪機場滑行時間由

2003 年低於 25 分鐘，2007 年已超過 35 分鐘，增加幅度相當大，航機滑行作業之燃油成本隨之增加。

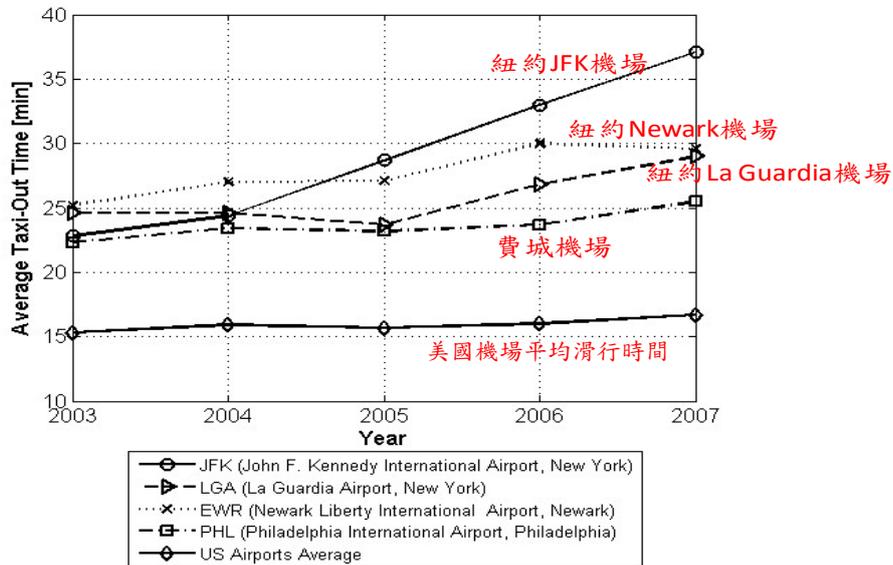


圖 4-6 2003-2007 期間美國紐約甘迺迪等機場航機滑行至跑道時間
資料來源：Dr. Craig Lawson

地勤拖車脫離後，航機向外滑行至跑道頭等待離場之 taxi-out 階段，此階段發動機以慢車速度滑行；而航機降落脫離跑道後，仍以發動機動力滑行至指定停機坪之 taxi-in 階段，此階段發動機亦處怠速狀態，甚至有部分航空公司關閉部分發動機，只保留一具發動機提供動力。由於航機發動機主要係提供向前之推力，無論 taxi-out 或 taxi-in 階段，使用發動機動力於場面滑行，實不具效率且對環境不友善，對場面上工作人員/裝備也有安全疑慮，有必要尋找其他替代方案以減少燃油消耗及對環境衝擊。

4.2 可能趨勢

依據現行作業方式，地勤拖車將航機從停機坪後推至定位即脫離，其後航機自行滑行至跑道頭等待離場起飛，直到飛抵目的機場降落，再自行滑行進入指定之停機坪為止，都是依賴自身發動機消耗燃油所產生的動力。根據統計，燃油成本約佔航空公司營業成本的 30%~40%，而航機在地面滑行所消耗燃油佔全部的 6%，甚或可能達 10%(部分機場航機滑行時間有日益增加情形)，一般來說，單走道飛機使用率每日約 8-10 小時，在地面時間平均 2.3 小時，據此推估，全球短程航機僅是在地面滑行作業階段，每年約消耗 5 百萬噸燃油，相當於每年產生 1,300 百萬噸的 CO₂ 排放。

航機使用發動機動力於場面滑行，並不具效率且對環境不友善，而全

球空運需求持續成長，所衍生之航機延誤、場面擁擠及環境衝擊問題則越來越受到關切，在滿足航空運輸需求及兼顧環境友善之大前提下，航機電動滑行系統為發展中的一項替代方案。如圖 4-7 所示，在現行作業模式下，地勤拖車脫離發動機啟動，而使用電動滑行系統則在航機滑行到跑道前才啟動發動機，最高可有效減少 10% 的燃油消耗，碳排等廢氣排放與噪音等環境污染可隨之減少^[42]。事實上，在 1970 年代石油危機之後，航空業即開始研究電動滑行解決方案，其後石油價格曾大幅下跌，使相關業者無意願及動力投資新的技術尋求解決之道，然現今環保意識高漲，油價相對亦在高點，航機電動滑行系統除可減少燃油消耗而降低作業成本外，並可提高航機自主性、加速地停作業(航機可能較準時抵達機坪)、增加航機起落架輪胎及煞車系統壽限，也能降低機場排放與噪音，及提升作業安全，目前已有相關業者投入綠色滑行系統之設計發展，可能成為未來趨勢。



圖 4-7 航機燃油消耗比較圖

資料來源：Dr. Terence Fan

航機滑行系統大致可歸納為 5 大類型(如圖 4-8)，包括現行的地勤後推拖車、油電混合拖車、鼻輪電動滑行系統、主起落架電動滑行系統，及另外加裝供航機滑行用的專用引擎等，預估至 2021 年前全球航機電動滑行系統市場可達 2.63 億美元，2017-2021 年期間年均複合成長率可能超過 10%^[43]。而近年針對商用客機所發展之電動滑行系統主要為鼻輪起落架電動滑行系統、主起落架電動滑行系統及油電混合拖車，分別以 WheelTug、Safran 及 TaxiBot 三個研發團隊為代表，每個系統皆有機會讓航機在滑行及後推階段減少燃油消耗，進而改善航機排放及噪音汙染，該些系統因設計

及操作上之差異，不同系統可能帶來之效益及使用上面臨之挑戰亦有所不同，以下針對該三種系統說明其設計原理及發展情形。

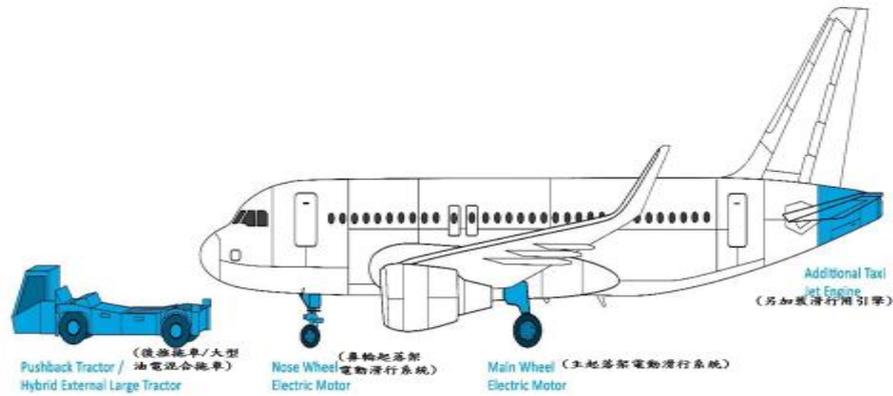


圖 4-8：各電動滑行之系統所在位置圖
資料來源: Dr. Terence Fan

4.2.1 WheelTug

本系統由位於英屬直布羅陀之 WheelTug 公司所研發，係在航機鼻輪起落架加裝電動馬達，馬達重量約 150 公斤，系統主要由電動馬達與驅動器、電子裝備以及操作面板(如圖 4-9 及 4-10)所構成，無須啟動航機發動機，而由輔助動力系統(APU)提供動力驅動馬達，讓航機能自行後推及滑行之進出停機坪，不需依賴地勤拖車，因而可提升航機自主性及滑行之效率，減少作業成本^[44]。



圖 4-9 WheelTug 電動滑行之系統配備圖示
資料來源: WheelTug-2017 IATA E-Taxi Conference

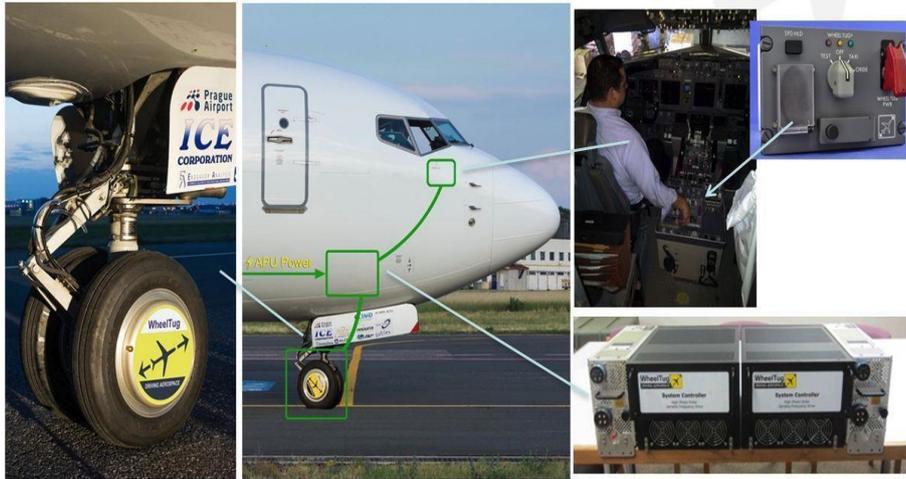


圖 4-10 WheelTug 電動滑行系統配備及駕駛艙相關位置
資料來源：Dr. Craig Lawson

該公司透過訪談瞭解大多數航空公司的需求，將研發重點聚焦在節省航機後推時間，於 2004-5 年間推出第一個原型產品，適用於波音 B767 型航機，由駕駛員於駕駛艙操作面板操控航機的後推及滑行。該公司認為其系統簡單、容易拆卸、可改裝，且著重於時間的節省，目前 98% 的航機係在 20 分鐘內完成後推，平均約 8 分鐘時間，如使用其電動滑行系統則僅需 1 分鐘，該公司強調目前先著重於滿足窄體機之需求，期減少航機後推風險、節省燃油消耗、降低發動機損耗。

WeehTug 電動滑行系統雖具有整合容易、重量輕、節省地面作業時間及可維修等優點，然在濕滑或結冰道面可能打滑，需較大扭力以帶動航機滑行；即便使用本系統之航機無須改裝機上輔助動力系統 (APU)，然藉助 APU 提供馬達動力意味也需耗用燃油。此外，本系統係於鼻輪起落架加裝電動馬達，使航機構型改變，因此須另申請取得型式認證 (Type Certificate, TC)，始可正式使用於相關航空器上，該公司針對供波音 737 新一代飛機 (通稱 737NG) 使用之電動滑行系統，已向美國 FAA 提出認證計畫，FAA 於 2017 年接受該認證計畫，該公司預估 2019 年即可取得認證，該系統最終是否確實能取得認證，須持續關注其後續發展。

在相關使用成本方面，據了解 WheelTug 目前係規劃以租賃方式將產品提供給航空公司使用，並由該公司免費安裝，航空公司於使用 WheelTug 系統的期間內，因此而節省的燃油成本及其他相關費用，其中一半則須回饋給 WheelTug。

4.2.2 Safran

Safran 團隊研發之電動滑行系統係在航機主起落架各裝設一個 50 千瓦

之電動馬達(如圖 4-11)，重約 400 公斤，搭配駕駛員操作介面、馬達控制系統、機輪傳動裝置等(如圖 4-12)，航機主發動機無須啟動，而由輔助動力系統(APU)提供電力驅動主起落架的馬達，讓航機能自行後推及滑行進出停機坪，不需依賴地勤拖車，提升航機自主性及滑行效率，減少作業成本，其設計概念基本上與 WheelTug 的鼻輪電動滑行系統類似^[45]。



圖 4-11 Safran 電動滑行系統(主起落架)

資料來源: Safran-2017 IATA E-Taxi Conference 及 Dr. Craig Lawson



圖 4-12 Safran 電動滑行系統配備

資料來源: Safran-2017 IATA E-Taxi Conference

相較於WheelTug系統，Safran系統之整合及維修較為複雜，且因電動馬達係安裝於主起落架處，同在該處之剎車系統之冷卻效率將因此降低，另使用本系統之航機須改裝機上輔助動力系統(APU)，然預期使用本系統可減少航機後推風險、節省燃油消耗、降低發動機損耗。如以航機由停機坪滑行至跑道頭需時17分鐘來看，相較於航機以雙發動機滑行，使用電動滑行系統滑行時，CO₂等各種排放量約可減少51% - 73%(如圖4-13)。

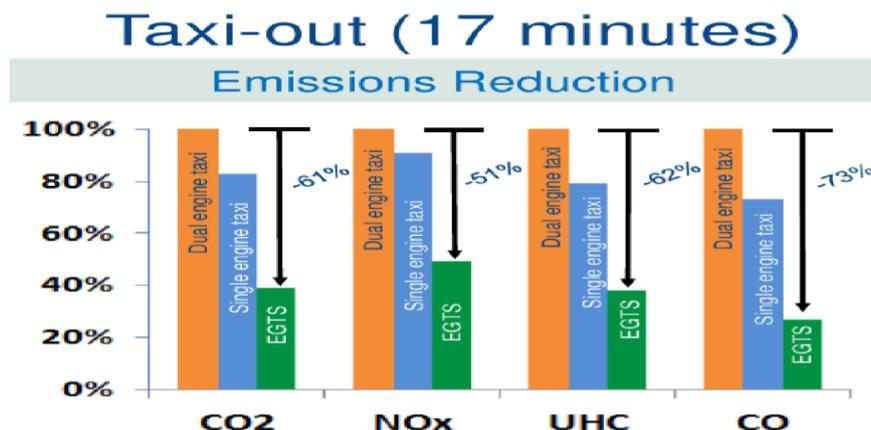


圖 4-13 使用 Safran 電動滑行系統各種排放量減少
資料來源: Dr. Craig Lawson

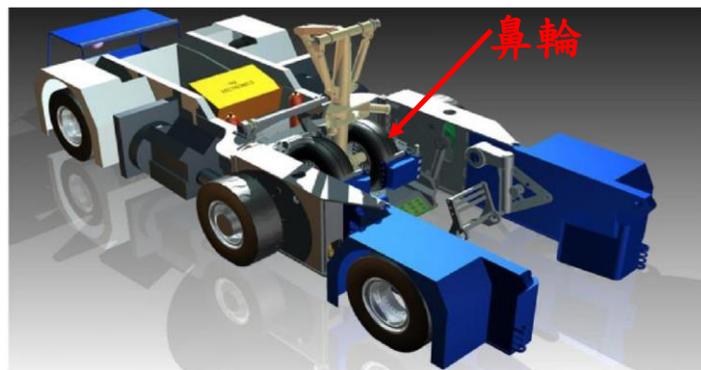
Safran 電動滑行系統中驅動航機前進的馬達安裝在主起落架上，使航機構型改變，故必須取得相關單位的認證後才能正式使用，本系統目前鎖定窄體機如空中巴士 A320 及波音 B737 等機型，尚無法應用於廣體機，主要因電動滑行系統係由航機輔助動力系統(APU)提供動力帶動馬達，廣體機重量較重，APU 恐無法提供足夠動力供電動滑行系統使用；另因廣體機通常用以飛航長程航線，400 公斤重之電動滑行系統發揮功用的時間僅限航機於機場地面短暫時間，在空中飛行時並無任何作用，但卻增加航機重量致燃油消耗增加，因此廣體機使用電動滑行系統尚無法帶來效益。

4.2.3 TaxiBot

TaxiBot(如圖 4-14)為 Taxiing Robot 之意，本電動滑行系統之設計概念不同於前述二系統，係由以色列航太公司(Israel Aerospace Industries)為主的團隊所研發，包括波音、空中巴士及漢莎航空子公司 Lufthansa LEOS 等皆參與其中，其基本前提也是無須啟動航機發動機，而係利用油電混合半自動式無拖桿拖車，讓航機後推及滑行，TaxiBot 以類似機器手臂方式扣住航機鼻輪(如圖 4-15)，由駕駛員在機艙內操控航機鼻輪方向，讓航機後推及滑行^[46]。



圖 4-14 航機由 TaxiBot 拖車帶動滑行
資料來源: Taxibot-2017 IATA E-Taxi Conference



CAD model of the TaxiBot showing aircraft nose wheel and landing gear fully engaged

圖 4-15 航機由 TaxiBot 拖車帶動滑行
資料來源: Dr. Craig Lawson

TaxiBot 基本上是種柴油動力之航機拖車，未來有可能改為電動式，由航機駕駛員直接在駕駛艙操控拖車，不需有拖車駕駛員，相較於 WheelTug 及 Safran 系統僅供窄體機使用，TaxiBot 可供重量較重之廣體機使用，其原理如圖 4-16，由拖車將航機鼻輪稍稍舉起並固定，航機駕駛員從駕駛艙直接操控航機鼻輪，當鼻輪固定於 TaxiBot 時，操控權由拖車駕駛移轉至航機駕駛員。航機駕駛員於機艙操控鼻輪方向之動作，係透過感應裝置傳送至 TaxiBot，而將航機帶往駕駛員所操控之方向；當駕駛員踩煞車時，系統偵測到航機阻力變大，TaxiBot 即停止運作；在 TaxiBot 將航機滑行至跑道頭等待位置時，即脫離航機返回航廈。



圖 4-16 TaxiBot 拖車扣住航機鼻輪
資料來源: Hospodka Jakub

該團隊認為 TaxiBot 系統具有下列優點：

1. 廣體機滑行時燃油消耗遠低於現行航機滑行方式，但實際節省情形則需視航機種類及發動機類型而定；
2. 可減少空氣汙染；
3. 外物損傷(Foreign Object Damage, FOD)減少；
4. 航機非以發動機動力滑行，噪音因此降低，減少對環境之衝擊；
5. 窄體機及廣體機皆可使用，TaxiBot 最大可提供 1,500 馬力之動力，最高可以 20 節速度(相當於每小時 37 公里)拖滿載之 A380 滑行；
6. 使用 TaxiBot 時，航機無須做結構上改變，也無額外的維修需求；
7. 傳統航機滑行速度視飛機原廠操作手冊、天氣及場面狀況而有所不同，一般在直線區域最大速度約 15 到 25 節(相當於每小時 28 到 46 公里)，轉彎時速度約 10 節(相當於每小時 19 公里)，TaxiBot 滑行速度則較快。

至其缺點則包括：1.價格偏高，可能是傳統拖車的 3 倍，以每小時允許 30 架次航機起降之機場來說，大約需 20 個 TaxiBot 始可因應航機滑行需求，投資金額相當大；2.於脫離航機返回航廈機坪時，航滑行道上可能同時有其他航機及 TaxiBot 移動，增加安全風險；3.僅可供航機由機坪向外滑行至跑道頭時使用。

目前 TaxiBot 有兩種型式，專供單走道窄體機使用者，包括空中巴士 A318 到 A321，及波音公司 B737 到 B757 等機型皆可使用，另一種則供雙走道廣體機使用，包括空中巴士 A330 到 A380，及波音公司 B767 到 B747 等機型。

4.2.4 小結

由於窄體機之輔助動力系統(APU)如同要需供應機上空調及燈光使用時，已無法再提供足夠動力給電動滑行系統帶動航機滑行，故藉助 APU 提供動力之 WheelTug 或 Safran 系統僅可供窄體機，而 TaxiBot 則可供窄體機及廣體機使用。此外，關於機載電動滑行系統整合問題，以裝載於鼻輪起

落架之系統較裝載於主起落架者易整合，因鼻輪起落架結構較為簡單，該處沒有剎車系統，可運用空間較大，然於該處加裝之電動馬達重量可能較輕，恐無法確保航機在所有道面狀況時所需之摩擦力。

前述三種發展中之系統，其基本設計原理、相關配備需求、是否需取得認證之比較如表 4-1，其中 WheelTug 及 Safran 係分別於航機鼻輪及主起落架加裝電動馬達，此改變航機構型，故須向相關單位另申請型式認證，於獲得認證許可後始可正式使用，目前皆僅供窄體機使用；而 TaxiBot 並未改變航機外型，無須另申請型式認證，並有分專供窄體機及專供廣體機使用之兩種拖車。

產品	原理	配備	是否需認證	備註
WheelTug	在航機鼻輪起落架加裝電動馬達	馬達及驅動器、電子裝備以及駕駛員操作面板	是 (馬達安裝於鼻輪起落架，改變航機構型)	1. 航機輔助動力系統提供電力驅動馬達 2. 鎖定窄體機
Safran	在起落架主裝馬達	馬達控制系統、駕駛員操作介面、機輪傳動裝置等	是 (馬達安裝於主起落架，改變航機構型)	1. 航機輔助動力系統提供電力驅動馬達 2. 先鎖定窄體機
TaxiBot	無拖桿拖車	油電混合半自動式無拖桿拖車	否 (既有航機外型未變更)	1. 以類似機器手臂方式扣住鼻輪 2. 分專供窄體機及廣體機用兩種

表 4-1 發展中之電動滑行系統比較
資料來源：本研究整理

4.3 關鍵指標

使用航機電動滑行系統有機會提升機場管理者及航空公司之作業效率，特別是在燃油消耗方面，此將連帶影響一些績效指標，包括安全、效率、航機延誤、容量、成本及環境影響等，該些指標涉及之利害關係人包括機場管理者、航空公司、航機駕駛員、地面作業人員、飛航服務提供者、民航主管機關、旅客、社會大眾等。

荷蘭皇家航空公司曾與荷蘭阿姆斯特丹史基浦機場合作，針對於該機場使用航機電動滑行系統進行研究，相關結論及關鍵指標如下：

1. 安全：

機場空側通常有各型航空器、車輛/裝備及作業人員在進行相關活動及操作，為讓機坪上進行地停作業之航機能準時後推及起飛，包括航機駕駛員、維修人員、地勤作業人員、空廚人員、加油人員等不同單位之人員，其所負責之各項不同作業多係同步進行，包括地勤拖車、加油

車、水車、電源車、冷氣車、氣源車、餐車、貨物和行李盤櫃等各式車輛及設備，可能同時在狹小的機坪範圍進行多項活動，故停機坪是個作業空間有限而作業機具佈滿航機四周的繁忙之地，而擁擠的機坪、準時的壓力等都是機坪作業的潛在風險，可能會造成嚴重地安事件(Ground Damage Incident, GDI)，也就是航機於停機坪地停與作業時，與其他航機或地面設施、車輛、裝備所致碰撞，造成機身外部蒙皮、結構及部件的損失^[47]。據統計，平均每年發生 2 萬 7 千件停機坪意外事件，平均每年近 24 萬人因停機坪意外事件受傷，每年全球航空公司嚴重地安事件的損失成本超過 50 億美元，由此可知機坪區域安全問題之重要性。

隨著空運需求持續成長，日增的航班對機坪作業及容量帶來不少壓力，在維持機坪作業安全及滿足容量需求前提下，機坪作業效率成為重要議題，航機使用電動滑行系統施行自主後推作業，可減少或消除對地勤拖車之需求，場面上作業拖車數量減少，意味著在航機周圍之各項操作活動減少，機坪區域發生碰撞及外物損傷(FOD)情形隨之減少，機坪區域安全得以提升；然駕駛艙內的駕駛員對航空器周遭情境感知能力可能下降，此恐有安全上疑慮。

其實，地勤拖車及航機後推操作程序本身對航空器就可能產生風險，依據史基浦機場 2013 年 1 月至 2015 年 9 月期間之統計，平均每 2 天就有 1 件地勤拖車意外事件；Dieke-Meier(2012)也指出 1991-2008 年期間，美國機場因使用傳統地勤拖車後推航機之程序而造成航空器損傷之情形並不罕見，此損傷不只意味高額的賠償成本，也危害地面作業人員人身安全，造成航班延誤。

航機電動滑行系統除了可減少 FOD 及航機後推的損害外，因為後推作業不再需要那麼多地面工作人員，機坪上作業人數減少，可進一步提升機坪安全，當航機周圍地面作業人數減少，發生嚴重傷害或死亡的風險即可能降低，故讓航空器能自主滑行的電動滑行系統，比起傳統作業模式具較高的安全優勢。

2. 容量及效率

航機使用電動滑行系統自主後推時，只要航機駕駛員獲得航管後推許可，即可進行後推程序，航機移動較具彈性及自主性，也較能掌控航機後推速度，與傳統使用地勤拖車後推相較，能節省些許時間，機坪擁擠情形也可能得到紓緩。

圖 4-17 上半部為航機以傳統拖車後推再以雙發動機滑行至跑道頭之時間，下半部為航機使用電動滑行系統自主後推及滑行至跑道頭之時

間，可以發現使用傳統地勤拖車後推航機者，從航機開始後推至獲得航管滑行許可約需 4 分鐘時間；而使用電動滑行系統後推及滑行者，因不使用拖車而無須等待拖車脫離，所需時間約 2 分 10 秒，亦即航機地停作業時間可稍微減少，雖然所節省時間不足 2 分鐘，航機準點及效率則有機會提升。對航空公司而言，航機地停作業時間減少，意味航機使用率增加，可為航空公司帶來更多收益。此外，航機使用率越高，電動滑行系統之使用率也越高，隱含電動滑行系統帶來的效益會更大。

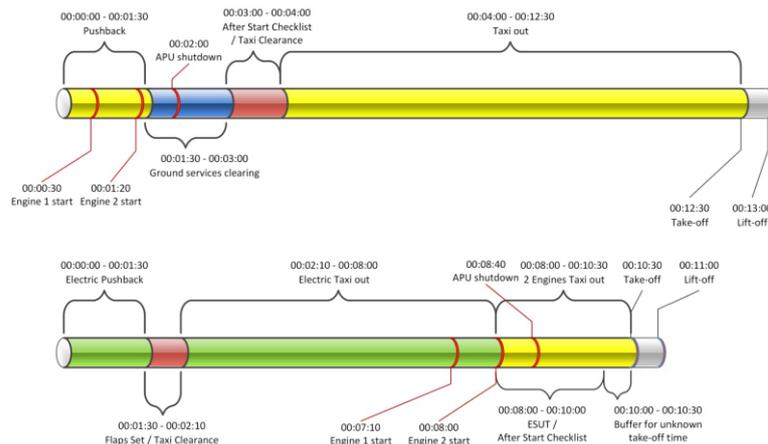


圖 4-17 航機以拖車後推/雙發動機滑行及以電動滑行系統後推/滑行比較
資料來源：S.M.L. Soepnel

3. 作業成本

使用航機電動滑行系統意味著減少使用航機主發動機及地勤拖車，對作業成本之影響可以從幾個面向來看。首先，地勤拖車的維修及油料成本會減少，史基浦機場之研究顯示，如該機場完全不使用地勤拖車，每年可節省的維修及燃油成本可達 460 萬美元；第二，作業人員成本減少，以松山機場為例，航機後推作業依規定須配置 4 名地勤作業人員（包括拖車駕駛員、耳機員及左右翼尖觀測員），使用航機電動滑行系統讓航機自主後推時，即便仍需翼尖觀測員協助留意航機周遭其他車輛/裝備/人員之動態，然相較於拖車駕駛員較高之薪資，相關成本仍可減少^[48]；第三，機坪上的地勤拖車可能會造成 FOD，且可能有碰撞航機的風險，減少甚或消除機坪上地勤拖車數量，將可減少碰撞航機的成本；第四，航機電動滑行系統本身亦有相關維修成本，且因電動滑行系統之動力來自航機輔助動力系統(APU)，故 APU 使用頻率將較傳統作業模式為高，APU 之維修成本相對增加。

4. 環境(排放及噪音)

傳統上航機於停機坪及跑道間往返滑行(即 taxi-in 及 taxi-out 兩個階段)係使用航機發動機提供之動力，使用航機電動滑行系統時，改由

APU 提供動力，與發動機提供動力相較，可減少燃油消耗，從而減少航機地面之排放、降低對環境之衝擊，故改用航機電動滑行系統所減少之排放，大部分來自於 taxi-in 及 taxi-out 兩個階段。

至於在停機坪部分，傳統以地勤拖車後推航機之作業，多數地勤拖車係使用燃油，減少機坪上地勤拖車數量，機坪上排放可隨之減少，在史基浦機場所之研究中，地勤拖車每次後推航機離開停機坪，約需使用 2.4 公斤燃油，航機以電動滑行系統後推約需使用 2.17 公斤，以該機場航機後推次數每年 40,258 次計算，如全數改用航機電動滑行系統，每年燃油需求可減少 9,260 公斤；而使用航機電動滑行系統後推航機，因係由 APU 提供動力，其實也需消耗燃油，然較地勤拖車之消耗量少，故原本以地勤拖車後推航機次數越多者，所減少燃油消耗越多，包括碳氫化合物(HC)、一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)及二氧化碳(CO₂)等之排放可隨之減少。此外，因地勤拖車係使用燃油，航機後推時減少或消除地勤拖車之使用，也可減少相關之燃油消耗及排放。

除了排放減少外，使用航機電動滑行系統也可降低機坪上噪音量，因為在航機後推階段已無須啟動發動機，故機坪上之噪音源只剩下航機輔助動力系統(APU)，以 B737、A319 等窄體機來說，APU 所產生之噪音約 64 分貝，而使用主發動機動力滑行時，發動機產生之噪音平均 75 分貝，故機坪上如無發動機產生之噪音，噪音量預估可降低 69%。

4.4 挑戰及課題

航機電動滑行系統可能為未來發展趨勢，任何新系統的導入代表有機會改善及提升既有作業模式之效率，但也可能有些新問題待解決，目前發展中之系統尚有部分課題有待釐清及處理。

某些航機電動滑行系統雖具有節省燃油、環境友善之優點，卻有些系統面問題。首先，機載滑行系統係於航空器之起落架加裝電動馬達，馬達額外的重量將增加航機飛行時的重量，增加飛行時之燃油消耗，空中飛行時間越長，燃油消耗增加越多，而航機在滑行階段所節省之燃油，則可抵消一部分的燃油消耗的增加。

此外，航機藉助電動滑行系統於機坪自主後推時，可能涉及現有標準作業程序的改變，新的作業程序可能會增加航機駕駛員工作量，因為現行由地勤拖車後推航機之作業方式，於航機後推過程中，大部分時間航機駕駛員只需專注於發動機啟動及啟動後之程序(主要是完成檢查程序及暖車)，駕駛員工作負擔較少；如改用航機電動滑行系統情況將有所改變，在航機自主後推過程中，駕駛員必須完全專注於後推工作，恐無暇顧及其他檢查

及發動機啟動程序。駕駛員工作關乎飛航安全，故於使用電動滑行系統執行航機自主後推作業前，務須詳細評估該操作對駕駛員工作量之影響，務期確保安全無虞。因航機電動滑行系統可能涉及駕駛員操作習慣的改變，駕駛員須接收額外的操作訓練，對航空公司而言，相關作業/維護成本及費用也隨之增加。

美國 FAA 之 Airport cooperative Research Program(ACRP)研究計畫旨在針對現行須啟動航機發動機之滑行方式，提出短期可能的替代方案，並協助評估不同滑行系統可能有的成本、燃油消耗、廢氣排放及噪音等問題，以及實際運用時可能遭遇之問題及挑戰。該研究認為相關替代方案具有下列特性：

1. 航機使用其他滑行系統滑行時，因未啟動發動機，不消耗燃油，故無排放問題，也不會產生噪音；
2. 其他替代滑行系統雖可減少航機滑行階段的燃油消耗、排放及噪音，實際減少量仍須視滑行時間長短、航機機型/大小及所選用之滑行系統而定；
3. 發動機必須在航機起飛前五分鐘預熱。

該研究認為無論哪一種替代滑行系統，皆應考量下列問題，才能真正符合使用者需求：

1. 成本問題：包括購買或租賃的費用，另亦須考量維修及燃油成本；
2. 目前(及未來)的滑行時間：發動機預熱或冷卻，最多可能需5分鐘時間，若滑行時間太短，替代方案能帶來的效益可能會很小；
3. 目前(及未來)的機隊組合：雖然某些替代方案能處理A380這類較大型航機，然多數替代方案是專為A320及B737這類窄體機設計；
4. 航機在滑行道(或接近跑道等待位置)時，要在哪個位置啟動主發動機，以及發動機啟動失敗問題(可能因此耽誤排在其後等待離場的其他航機)；
5. 需增加額外的人員及相關訓練；
6. 滑行速度(在擁擠機場，航機可能需前進/停等以避讓其他航機)，以及是否有能力讓航機在安全時間內穿越使用中的跑道；
7. 現有航機本身須做的變更或改裝，包括因航機構型改變，得從FAA取得必須要的認證；。
8. 機場方面須做的變更或調整，例如機場基礎設施等；
9. 替代系統是否由駕駛員操控；
10. 尚未經認證的滑行系統取得認證的可能性；
11. 安全性；
12. 與航管單位間對於發動機啟動時間之溝通聯繫；

13. 可能節省的時間。

單從成本面來看，航空業者使用替代滑行系統時，燃油成本、地勤拖車費用等項目之成本支出可能減少，航機延誤及滑行時間可能減少；然某些項目之支出也可能增加，最主要是替代滑行系統本身的成本。以外接式滑行系統(如TaxiBot)來說，供窄體機用的小型拖車價格可能約150萬美元，供廣體機用者可能達300萬美元；而機載滑行系統(如WheelTug或Safran)部分，供窄體機使用者價格約26萬美元，供廣體機使用者可能達100萬美元。此外，使用機載滑行系統者，尚有額外的作業、維修、系統安裝致航機須停止派飛的時間及人事成本，可能對航空公司造成不同程度影響。另有機載滑行系統製造商係要求航空公司簽署租賃合約，航空公司因使用其機載滑行系統所節省之費用，其中一半須回饋給系統製造廠商。

對於各替代滑行系統之效益，應有必要以較詳細的資料，如航機滑行速度及相對產生的排放量等等，更精確計算燃油消耗及排放量^[49]。

4.5 小結

航機電動滑行系統可提升機坪作業之安全及效率、降低作業成本、減輕機坪作業對環境造成之衝擊，效益之多寡部分取決於採用航機電動滑行系統作業之航機數量，越多航機使用效益越高；然其導入也意味著新的挑戰，部分系統甚或涉及現有標準作業程序的改變。

從機場角度來看，航機使用電動滑行系統時，滑行階段不需啟動發動機，不會產生尾流及排放廢氣，噪音問題較小，場面工作人員的安全及健康問題得以提升。以航空公司來看，航機後推不需依賴地勤拖車，航機自主性增加，航空公司較能掌控航機滑行時間，航機準點情形有可能提升，間接提升機場空側管理者對機坪使用狀況的掌控及調度能力。

一般來說，小型機場航班數量較少，航廈與跑道間距離較短，航機滑行至跑道的時間甚至可能與引擎預熱的時間相當，則使用傳統滑行方式較為妥當，但在大型繁忙機場，航機滑行時間可能相當長，故評估替代滑行系統效益時，機場大小規模、場面配置及航班量多寡都扮演重要角色。

五、結論及建議

5.1 結論

1. 傳統航機離到場主要採階段式爬升/下降操作，增加飛行時間、燃油消耗及排放，持續爬升/下降操作及性能導航等飛航技術之運用有助提升效率，減少對環境衝擊。

2. 航機機載裝備日新月異，航機離到場操作在既有運作技術及基礎上，發展出新的應用模式，有機會提升作業效率、適度紓緩跑道及空域日漸飽和問題。
3. 桃園機場自 102 年 12 月 12 日起於夜間離峰時段實施持續下降操作作業，如航機駕駛員提出需求，管制員會審酌航情與空域狀況，儘力促成持續下降操作作業。
4. 全球空運需求持續成長，航機延誤、擁擠及航空運輸對環境造成衝擊等問題，航機電動滑行系統為一創新方案，讓航機毋須使用發動機或地勤拖車即可移動，發展中之系統包括鼻輪起落架系統、主起落架系統及油電混合拖車，各系統因設計及操作上之差異，可能帶來之效益及使用上之限制各不同。
5. 航機電動滑行系統有機會提升作業效率，減少燃油消耗、排放及噪音，其效益評估指標主要有安全、容量/效率、成本及環境(排放及噪音)影響等 4 個項目。

5.2 建議

1. 相關主管機關、機場單位及航空公司持續關注國際上航機離到場操作程序相關發展及國際民航組織之相關建議。
2. 我國在性能導航相關導入方面，已依規劃時程逐步推動航路與終端空域 PBN 的運用，後續建議持續關注歐美下一代航管系統計畫(NextGen 與 SESAR)中相關技術的最新運用，於制定我國性能導航實施計畫時，將相關發展趨勢一併納入考量。
3. 民航局「臺北飛航情報區性能導航(Performance-Based Navigation, PBN)實施計畫」初版公布至今 5 年時間，建議民航局參酌國際最新發展趨勢，適時更新相關計畫內容。
4. 航機電動滑行系統替代方案可能為未來趨勢，屆時航機地面操作模式及程序可能有所改變，建議機場管理者、航空公司、地勤業者持續關注此議題及相關進展，適時調整修訂相關作業程序或規定。
5. 使用機載電動滑行系統方案，既有航機須配合變更或改裝，且購置成本較高，建議國籍航空公司及地勤業者持續關注未來發展情形，預為規劃包括航機駕駛等相關人員之教育訓練。

參考文獻

1. IPCC ,「Climate Change 2007- Mitigation of Climate Change」, 2007。
2. 林信宏、張博涵,「機場機坪管理出國報告」, 民用航空局, 民國 105 年
3. 民航局,「航空站空側作業管理手冊」, 民國 105 年。
4. ICAO Environment, Air Transport Bureau ,「Global Aviation Dialogues (GLADs) - Aviation Emissions Trends」, 2015。
5. ICAO , Document 9931 ,「Continuous Descent Operations(CDO) manual」, 2010。
6. ICAO , Document 9993 ,「Continuous Climb Operations(CCO) manual」, 2010。
7. Eurocontrol , 「Continuous Descent – A guide to implementing Continuous Descent」, 2011。
8. Paul Mark Alexander DE JONG ,「Continuous Descent Operations Using Energy Principles」, 2014。
9. British Aviation Authority ,「Basic Principles of the Continuous Descent Approach (CDA) for the Non-Aviation Community」, 2006。
10. James Brooks ,「Continuous Descent Arrivals – ICAO workshop on Aviation Operational Measures for Fuel and Emissions Reductions」, Georgia Institute of Technology , 2006。
11. Javier Perez-Castan 等 ,「Continuous Climb Operations: The following step」, 2015。
12. British Aviation Authority 等 ,「Reducing the Environmental Impacts of Ground Operations and Departing Aircraft – An Industry Code of Practice」, 2012。
13. Ozlem Sahin Meric 等 ,「Evaluation of aircraft descent profile, International Scientific “Environmental and climate Technologies”, CONECT」, 2015 年。
14. 周宗毅,「臺灣桃園國際機場實施持續下降操作程序下航機隔離方案評估之研究」, 國立臺灣海洋大學碩士論文, 民國 102 年。
15. S.M.L. Soepnel ,「Impact of Electric Taxi Systems on Airport Apron Operations and Gate Congestion at AAS」, Delft, University of Technology , 2015。
16. Dr. Craig Lawson ,「eTaxi Fuel Cell System - Feasibility for Low Cost

- Carriers」，2016。
17. Fabrizio Re，「Model-based Optimization, Control and Assessment of Electric Aircraft Taxi System」，2017。
 18. Hospodka Jakub，「Electric Taxiing – TaxiBot System」，Czech Technical University，2014。
 19. Parth Vaishnav，「Cost and Benefits of Reducing Fuel Burn and Emissions from Taxiing Aircraft」，2013。
 20. 交通部航空數位博物館，網址：<https://transport-curation.nat.gov.tw/201710250001/content/m102.html>。
 21. 民用航空局，「飛航規則」，民國 103 年。
 22. 民用航空局，「飛航管理程序(ATMP)第十二版」，民國 107 年。
 23. 陳翊歲，「國際民航組織儀航程序設計規範初訓出國報告書」，民航局，民國 105 年。
 24. Eurocontrol 等，「European Joint Industry CDA Action Plan」，2009 年。
 25. 倫敦希斯洛機場網頁，網址：<https://your.heathrow.com/heathrow-arrivals-whats-involved-with-landing-an-aircraft-at-the-uks-busiest-airport/>。
 26. 民航局，「CDO 到場作業管制員訓練-概念部分」，民國 102 年。
 27. ICAO，Document 9613，「Performance-based Navigation (PBN) Manual, 4th edition」，2013。
 28. ICAO，Document 8168，「Aircraft Operations - Procedures for Air Navigation Services」，2014。
 29. ICAO，Document 9905，「Required Navigation Performance Authorization Required (RNP AR) Procedure Design Manual」，2016。
 30. 趙培虎等，「赴新加坡參加『通訊、導航、監視/飛航管理(CNS/ATM)研討會』」，民航局，民國 97 年。
 31. FAA，「Performance Based Navigation Navigation Strategy」，2016。
 32. Eurocontrol，「Introducing Performance Based Navigation (PBN) and Advanced RNP(A-RNP)」，2013。
 33. FAA 網址：www.faa/gpv/nextgen。
 34. SESAR Joint Undertaking，「SESAR Solutions Catalogue」，2015。
 35. Fraport AG 網址：
<https://www.fraport.de/content/fraport/de/nachbarschaft-region/dialog/wissenswertes/flugbetrieb/was-ist-point-merge-.html>，

- 2017。
36. RocketRoute 網址：<https://www.rocketroute.com/blog/london-city-point-merge-important-notes-for-crews>，2016。
 37. ConceptsBeyond 網址：<http://www.conceptsbeyond.com/domains-of-expertise/aviation-laboratories/>，2018。
 38. 民航局，「臺北飛航情報區飛航指南」，2018年。
 39. 民航局，「臺北飛航情報區性能導航(Performance-Based Navigation, PBN)實施計畫」，2016年。
 40. 何立己，「停機坪安全」，飛航安全基金會「2012年飛行安全夏季刊」，民國101年。
 41. 臺灣桃園機場公司，「臺灣桃園國際機場空側車輛駕駛手冊」，民國106年。
 42. Terence Fan，「Frequency as airlines' means to accommodate growth, and implicatio on e-taxiing」，2017。
 43. TechNavio-Infinitt Research Ltd.，「Global Aircraft Electric Taxiing Systems Market 2017-2021」，2017。
 44. WheelTug，2017 IATA E-Taxi Conference，2017。
 45. Safran，2017 IATA E-Taxi Conference，2017。
 46. TaxiBot，2017 IATA E-Taxi Conference，2017。
 47. 翁樹忠，「交通部民用航空局馬公航空站安全管理系統(SMS)研習」，民國106年。
 48. 臺北國際航空站，「松山機場停機坪安全管理規定」，民國103年。
 49. Damon Fordham，「ACRP Project 02-05 (Report 158), Deriving Benefits From Alternative Aircraft-Taxi Systems, IATA E-Taxi Conference 2017」，2017。